



TU Clausthal

Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik

Entwicklung eines Aufbereitungsverfahrens zur Rückgewinnung feinkörniger NE Metalle und mineralischer Bestandteile aus Shredder-Sand

Dissertation

Zur Erlangung des Doktorgrades

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Christian Duwe

aus Duderstadt

genehmigt von der

Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der

Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

02.09.2016

Vorsitzende der Prüfungskommission:

Prof. Dr. rer. pol. Inge Wulf

Hauptberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Mitberichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz

"Science is about what is. Engineering is about what CAN be."

Neil Armstrong

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der Technischen Universität Clausthal.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing Daniel Goldmann, der es mir ermöglicht hat, an diesem Thema zu arbeiten und es schließlich zu einer promotionswürdigen Arbeit zusammenzufassen. Als Betreuer und Mentor hatte er selbst im tiefsten Stress ein offenes Ohr für meine Probleme und war stets mit einem Rat bei der Hand. Auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Pretz gilt mein Dank für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Den Projekt-Partnern des Shredder-Sand-Projektes gilt mein Dank, da über drei Jahre eine konstruktive und freundliche Atmosphäre das Arbeiten mit den Fragestellungen rund um den Shredder-Sand bestimmten. Namentlich seien hier die Herren Dr. Schmid, Schülke, Guschall und Daginnus genannt.

Dank gilt auch dem Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Projektträger Jülich für die Förderung und Betreuung des Projektes.

Die Arbeitskollegen im IFAD waren eine freundliche und höchst kompetente Unterstützung, wenn es beispielsweise Probleme gab, dem Shredder-Sand ein bestimmtes Trennverhalten aufzuzwingen. Selten waren sie um eine Hilfestellung verlegen – vielen Dank. Auch ein Dankeschön, dass die gemachten Arbeiten und Ergebnisse Anklang fanden und in manch anderen Prozess erfolgreich integriert wurden. Das zeigt schließlich, dass die eigene Arbeit auch über die eigenen Ziele hinaus genutzt werden kann. Speziell Petra, Heike und auch Friederike sei für ihr präzises Messen und Analysieren gedankt, mussten sie für den Shredder-Sand doch streckenweise neue Vorgehensweisen erarbeiten.

Auch den Studenten, die im Rahmen von Bachelor- oder Studienarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich mich bedanken. Namentlich sind dies vor allem die Herren Hartmann, Wang, Lu, Li, Wei und Sun.

Meinem „Haupt-HiWi“ Tim Ketzler gilt dabei ein Extradankeschön für seine Ausdauer in den drei Jahren Shredder-Sand-Projekt. Ob beim Recherchieren, Sieben, Mahlen oder

Flotieren - ohne groß zu murren hat er stoisch bei jedem noch so bizarren Versuch assistiert. Ohne seinen tagelangen Einsatz im Flot-Labor wäre die BU Weimar wohl nie an ausreichende Problemengenen gekommen.

Nach dem Diplom ist die Promotion die zweite große akademische Prüfung, die von mir abgelegt werden soll. Die mit jeder großen Prüfung einhergehenden Schwierigkeiten im Bereich nervlicher Stabilität und emotionaler Festigkeit erhielten ganz große Unterstützung durch meine Familie, die sich meine auch mal längeren Ausführungen anhörten. Das anschließend begeistert vorgebrachte „Aha“ war immer aufbauend, auch wenn der Blick in die Zuhörerschaft meist ein Blick in fragende Gesichter war.

Allen, die meine Arbeit zur Probe gelesen und kommentiert haben, sei hiermit ein spezielles Dankeschön zuteil – nur durch die Hilfe dieser Freunde konnte die Arbeit so „weltraum“ werden, wie sie es jetzt ist.

Zu guter Letzt möchte ich meiner wunderbaren Ehefrau Dr.-Ing. Stephanie Duwe danken, die mehr noch als jeder andere Mensch unter den Auswüchsen der Dissertationsarbeit, wie tief nächtliche Intuitionen, ratloses Hin- und Her-Gerenne, stark verkürzter Nachtruhe, geistige Abwesenheit und akuten Schreibattacken leiden musste. Wenn man in den höheren geistigen Sphären einer Dissertation schwebt, kommen einem die Probleme des Alltages manchmal fürchterlich fern und trivial vor. Daher ist es häufig eine Hilfe gewesen, zu wissen, dass es noch jemanden gibt, der in den „alltäglichen Belangen“ für einen mitdenkt und einen zur Not auch wieder ein wenig erdet. Danke Stephie, dass Du mir den Rücken freigehalten hast und immer für mich da bist!

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Bilanzierung eines Aufbereitungsverfahrens für Shredder-Sande. Es hat gezeigt, dass die Rückgewinnung einzelner Produktströme aus Shredder-Sand möglich ist. Es wurde dabei ein Verfahren mit sieben Hauptschritten entwickelt, die fraktionierte Teilströme ausschleusen. Nach der Benetzung wird im ersten Schritt eine textile Fraktion abflotiert. Diese Fraktion wird im zweiten Schritt von feinkörnigen Bestandteilen befreit, die dem Flotationsrückstand zugeführt werden. Die Flotationsrückstände werden im dritten Schritt auf einem Nassherd einer weiteren Abreinigung von organischen Bestandteilen unterzogen. Insgesamt werden so etwa 24 M-% der Aufgabe als organische Bestandteile (Leichtfraktion) ausgeschleust. Die dabei auch entstehende Schwerfraktion ist eine Fraktion aus metallischen und mineralischen Anteilen, die zur weiteren Aufbereitung im vierten Schritt Magnetscheider-Stufen in einer Rougher-Cleaner-Scavenger-Schaltung zugeführt wird. Hierdurch können marktfähige Eisen-Konzentrate erzeugt werden, die rund 25 M-% des ursprünglichen Shredder-Sand-Inputs ausmachen. Der von magnetischen Bestandteilen abgereicherte Rückstand wird im fünften Schritt durch gezielte mechanische Beanspruchung in einer Stabmühle mit nachgeschalteten Siebung in seine metallischen und mineralischen Bestandteile aufgeteilt. In Summe wird so ein Kupferkonzentrat ausgetragen, dass etwa 1 M-% der Aufgabe ausmacht. Der verbleibende Stoffstrom muss im sechsten Schritt durch Laugung von metallischen Restbestandteilen befreit werden. Um dies zu erreichen, kann salzsauer gelaugt werden. Während der Quarz und der silikatische Anteil im Laugerückstand zurückbleiben (ca. 34 M-% des Inputs), gehen die Metalle und geringe Mengen an Karbonaten in Lösung und können im siebten und letzten Schritt als Fällungsschlämme (15 M-% des Inputs) durch Neutralisationsfällung abgetrennt werden.

Die technischen Zielsetzungen des Prozesses wurden damit erreicht und führen zu guten Ergebnissen. Sowohl die ökologische als auch die ökonomische Bewertung des Verfahrens zeigen dessen Grenzen auf. Für eine Umsetzung in den Pilotmaßstab scheitert es bislang vor allem an den benötigten Mengen des entsprechenden Input-Materials durch fehlende Vorbehandlungsstufen in Deutschland.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis / Begriffsbestimmungen	XI
Abbildungsverzeichnis.....	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
1 Einleitung und Stand der Kenntnis	1
1.1 Einleitung und Problemstellung	1
1.2 Stand der Kenntnis	4
1.2.1 Entstehung von Shredder-Sand.....	4
1.2.2 Anfall an Shredder-Rückständen und Shredder-Sand	10
1.2.3 Rechtliche Grundlagen zur Behandlung von Shredder-Sand	10
2 Vorarbeiten	17
2.1 Analytische Vorcharakterisierung des Ausgangsmaterials.....	17
2.2 Wissenschaftliche Vorarbeiten zur Aufbereitung von Shredder-Sanden	18
2.3 Probennahme der Untersuchungsproben	21
2.4 Angewandte Analysemethoden	23
2.5 Materialcharakterisierung	24
3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	31
4 Aufgabenstellung und Arbeitsplanung des vorliegenden Projektes	33
4.1 Arbeitspaket 1: Entwicklung des Separationsverfahrens	34
4.2 Arbeitspaket 2: Verwertungstests an Aufbereitungsprodukten	35
4.3 Arbeitspaket 3: Anlagenkonzeptionierung bis basic design	35
4.4 Arbeitspaket 4: ökonomische Bewertung	35
4.5 Arbeitspaket 5: Bewertung von Materialeffizienz und ökologischer Wirkung	35
4.6 Arbeitspaket 6: Projektabschluss und Transfer	36
5 Entwicklung eines Separationsverfahrens für die Auftrennung von organischen Bestandteilen, Metallen und mineralischen Bestandteilen	37
5.1 Verfahrensentwicklung	37
5.1.1 Benetzung	37
5.1.2 Abtrennung der Organik	38
5.1.3 Abtrennung eisenhaltiger Bestandteile	54
5.1.4 Kupfer-Abtrennung.....	58
5.1.5 Chemische Metallabtrennung	62

5.1.6	Gesamtdarstellung des entwickelten Verfahrens zur Aufbereitung von Shredder-Sand	78
5.2	Anwendung des Verfahrensansatzes auf Shredder-Sand-Proben unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung.....	80
5.3	Erweiterungen der Untersuchungen auf Shredder-Sandfraktionen > 1 mm.....	80
5.4	Peripherie-Prozesse und Ermittlung prozesstechnischer Parameter.....	82
5.5	Verwertungstests an Aufbereitungsprodukten.....	85
5.5.1	Kupferlitzen	85
5.5.2	Eisen-Konzentrat	85
5.5.3	Mineralstoff-Fraktion	86
5.5.4	NE-Metallfällungsschlämme	89
5.5.5	Restorganik.....	91
5.6	Zusammenfassung der Verfahrensuntersuchung.....	91
6	Anlagenkonzeptionierung sowie rechtliche, ökologische und ökonomische Wirkung....	93
6.1	Anlagenkonzeptionierung.....	93
6.1.1	Szenarioentwicklung	93
6.1.2	Basic Design	96
6.2	Klärung relevanter Fragen zum abfallrechtlichen Genehmigungsverfahren.....	109
6.3	Ökonomische Wirkung bei der Umsetzung des Verfahrens	110
6.3.1	Ermittlung der Logistikkosten für In- und Outputwege	110
6.3.2	Ermittlung der Kosten und Erlöse für Input und Output, Marktentwicklung.....	111
6.3.3	Identifizierung optimaler Standorte einer möglichen Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage.....	124
6.4	Materialeffizienz und ökologische Wirkung	131
7	Zusammenfassende Bewertung unter technischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten	141
7.1	Technische Bewertung	141
7.2	Ökologische Bewertung	142
7.3	Ökonomische Bewertung	142
8	Fazit und Ausblick.....	145
	Literaturverzeichnis	151
	Anhänge.....	155

Abkürzungsverzeichnis / Begriffsbestimmungen

AVV	Abfall Verzeichnis Verordnung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BST	Belgian Scrap Terminal
BVSE	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.
EBITDA	earnings before interest, taxes, depreciation and amortization (Gewinn vor Zinsen, Steuern, Abschreibungen)
EBT	earnings before taxes (Gewinn vor Steuern)
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
ELV	End of Life Vehicle (Altfahrzeug)
IFAD	Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der Technischen Universität Clausthal
KrW-AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KrWG	Kreislaufwirtschafts Gesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanzierung)
M-%	Massenanteil in Prozent
NELV	Non-ELV
NE-Metalle	Nicht-Eisen-Metalle
PST	Post-Shredder-Technologie, Aufbereitungsverfahren, die nach der Shredderung und der Auftrennung in SLF und SSF einsetzen
RC	Recycling
Recylex	Recylex GmbH
Shredder-Sand	Shredder-Sand bezeichnet in der vorliegenden Arbeit die Rückstände aus dem Volkswagen-SiCon-Verfahren mit Korngrößen < 1 mm. Andere Korngrößenklassen werden entsprechend im Text gekennzeichnet
SICON	SICON GmbH
SLF	Shredder-Leicht-Fraktion, Fraktionen, die durch Windsichtung oder Staubabsaugung aus den Shredder-Rückständen abgetrennt werden

SSF	Shredder-Schwer-Fraktion, nicht magnetische Fraktion aus NE-Metallen und schweren Kunststoff-Teilen
V-%	Volumenanteil in Prozent
VW	Volkswagen AG

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verfahrensstufen, Stoffströme und Absatzwege im Volkswagen-SiCon-Verfahren	9
Abbildung 2: Verfahrensidee aus [1]	19
Abbildung 3: Entwicklung des Zinkanteils im Shredder-Sand < 1 mm für eine Tonne Standard-Input-Mischung nach [2]	20
Abbildung 4: Vorbehandlung des Materials nach der Erzeugung durch das VW-SiCon-Verfahren	23
Abbildung 5: Shredder-Sand-Proben aus den Untersuchungen - verwendetes Versuchsmaterial mit Korngrößen < 1 mm	25
Abbildung 6: Korngrößenverteilungssumme Q_0 und Korngrößenverteilungsdichte q_0 bezogen auf die mittlere Korngröße der jeweiligen Kornklasse $x_{b,m}$	26
Abbildung 7: Darstellung einzelner Kornformen aus Shredder-Sanden (Stereomikroskop, trocken, 8fach)	27
Abbildung 8: Skizze der Umlenksichtung und Trennung der Schwer- und Leichtgutfraktion aus der Förderluft (nach [35])	40
Abbildung 9: Verfahrensfließbild zur trockenen Abtrennung von textilen Anteilen aus Shredder-Sanden	41
Abbildung 10: Pneumatische Flotationszelle der MBE mit Beschickung aus Shredder-Sand. Auftretende Zonen innerhalb der Flotation sind voneinander abgetrennt	45
Abbildung 11: Flotat-Probe nach der Trocknung (Stereo-Mikroskop, trocken, 8-fache Vergrößerung)	47
Abbildung 12: Flotat-Probe $\geq 250 \mu\text{m}$ nach Siebung und Trocknung (Stereo-Mikroskop, trocken, 6,5-fache Vergrößerung)	48
Abbildung 13: Verfahrensfließbilder Flotationsstufe zur Abtrennung der textilen Anteile aus Shredder-Sanden	49
Abbildung 14: Rückstand aus der Flotation als Input für Nassherdstufe aus Shredder-Sand (Stereomikroskop, trocken, 6,5fache Vergrößerung)	50
Abbildung 15: Schematische Skizze zur Funktion eines Nassherdes oder Nasstrenntisches mit Bezeichnungen zur Neigung, Aufgabe und Austrag der Fraktionen	51
Abbildung 16: Leichtgut-Fraktion der Nassherdstufe (nach Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)	53
Abbildung 17: Verfahrensfließbild Magnetscheider-Stufen, wobei (1) für magnetische Stoffströme steht und (2) für unmagnetische Stoffströme	57
Abbildung 18: Eisen-Konzentrat (nach Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)	58
Abbildung 19: Kupferkonzentrat $> 250 \mu\text{m}$ (nach der Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 20fache Vergrößerung)	61
Abbildung 20: Flussdiagramm Mahlung und Siebung	62

Abbildung 21: Gehalte ausgewählter Metalle im festen Laugerückstand nach 120 minütiger Laugung bei 90 °C mit Schwefelsäure (1 mol), Salpetersäure (1 mol) und Salzsäure (1 molar). Als Richtwerte sind die Grenzwerte der LAGA Z2 aufgeführt	66
Abbildung 22: Darstellung des Lauge-Ausbringens über die Zeit in einem salzsauren System für ausgesuchte Metalle (1 molare Salzsäure, 90 °C, gerührte Laugung, H ₂ O ₂ -Beteiligung)	68
Abbildung 23: Ausbringen unterschiedlicher Laugesysteme auf Grundlage 0,5 molarer Salzsäure. HCl ohne Zusatz von H ₂ O ₂ (1), HCl mit Zugabe 1 ml H ₂ O ₂ alle 5 Minuten (2) und einmaliger Zugabe von 10 ml H ₂ O ₂ (3) zu Beginn der Laugung (für 120 Minuten)	69
Abbildung 24: mineralisches Konzentrat (nach der Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)	72
Abbildung 25: Verfahrensfliessbild zur vollständigen Rückgewinnung von Metallen aus der Laugelösung nach [3], die Zugabe von Stoffen ist in blau gekennzeichnet (z.B.: + NaOH)	75
Abbildung 26: Abfiltrierte Fällungsschlämme aus der Neutralisationsfällung (nach der Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)	77
Abbildung 27: Vereinfachter vollständiger Verfahrensweg für die Aufbereitung von Shredder-Sanden < 1 mm aus den Rückständen des Volkswagen-SiCon-Verfahrens zur Rückgewinnung einer Kupfer-, einer Eisen-, einer Fällungsschlamm- und einer Baustoff-Vorkonzentrat-Fraktion. Die prozentuale Angabe der Legende bezieht sich auf den Anteil der Produkte aus der Verfahrensstufe, wenn die Aufgabe in die Stufe 100 % ist.	79
Abbildung 28: Stoffflüsse der fluiden Prozessströme. Die Wasser-Input-Menge in die Stufe wird relativ zum zugeführten Feststoff angegeben (bezeichnet als „vF“ [„Vom Feststoff“]). Die Aufteilung nach der Stufe erfolgt relativ zur Wasserinput-Menge (bezeichnet als „vW“ [„Vom Wasserinput“]).	84
Abbildung 29: Chemische Zusammensetzung der mineralischen Fraktion des Shredder-Sands im Vergleich zu der von Mauerwerkbruch (MW) und kommerziellem Blähton (BT) sowie zu den markierten Bereichen für blähfähige Tonrohstoffe nach Riley [4] (gestrichelte Linie) und Wilson [5] (durchgängige Linie) im Dreistoffsystem Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -Flussmittel	87
Abbildung 30: Leichtgranulat 2/4 mm aus der mineralischen Fraktion des Shredder-Sands	88
Abbildung 31: Verfahrensfliessbild mit Medienversorgung und Schnittstellen [SICON] ..	108
Abbildung 32: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlichen Annahmepreisen von Shredder-Sand nach [SICON]	119
Abbildung 33: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Abgabepreise von Eisen-Konzentraten nach [SICON]	120
Abbildung 34: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Kupfer-Konzentrationen und damit geänderter Abgabepreise des Kupfer-Konzentrates nach [SICON]	122

Abbildung 35: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung veränderlicher Wasserverbrauchsmengen und den dadurch entstehenden Kosten nach [SICON]	123
Abbildung 36: Übersicht möglicher Standorte für Shredder-Sand-Aufbereitungsanlagen [6]	125
Abbildung 37: LCA-Bilanzgrenze und vereinfachtes Verfahrensfliessbild für die Basis-Variante des Aufbereitungsverfahrens von Shredder-Sanden nach [7]	132
Abbildung 38: LCA-Bilanzgrenze und vereinfachtes Verfahrensfliessbild für die erweiterte Variante des Aufbereitungsverfahrens von Shredder-Sanden nach [7]	133
Abbildung 39: Beitrag einzelner Metalle des Fällungsschlammes zu den Wirkungskategorien der vergleichenden Ökobilanz - Potentialabschätzung [8].....	140
Abbildung 40: Erreichbare Anteile der Fraktionen bezogen auf die Aufgabe in das Verfahren bei Umsetzung der "Erweiterten Variante"	147
Abbildung 41: Erreichbare Anteile der Fraktionen bezogen auf die Aufgabe in das Verfahren bei Umsetzung der "Basis-Variante"	148

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Genehmigungsverfahren nach BImSchG	13
Tabelle 2: chemische Analyse ausgewählter Elemente einer Shreddersandprobe < 5 mm ..	18
Tabelle 3: Vergleich der chemischen Analysen durchschnittlicher Proben aus den eigenen Untersuchungen und einer durchschnittlichen Probe aus den Untersuchungen [1]	28
Tabelle 4: Zusammensetzung der Shredderrückstände und Anteile im VW-SiCon-Verfahren nach [9]	29
Tabelle 5: Gehalte ausgewählter Elemente in der Flotatfraktion bei pneumatischer Flotation in Abhängigkeit von der Zeit	43
Tabelle 6: Vergleich der trockenen und der nassen Abtrennung von textilen Anteilen aus Shredder-Sanden im Hinblick auf Masse, Glühverlust und Kohlenstoffgehalt im Rückstand.....	46
Tabelle 7: Gehalte der Fraktionen nach Nassherd (NH) im Vergleich zu dem Inputmaterial in die entsprechende Stufe im Schwergut (SG) und Leichtgut (LG).....	53
Tabelle 8: Übernahme kriterien für eisenhaltige Reststoffe der DK Roheisen (Stand: 03.08.2009)	55
Tabelle 9: Übersicht ausgewählter Elemente im In- und Output der Magnetscheiderstufen	56
Tabelle 10: Vergleich der Grenzwerte nach LAGA M 20 Z2 und der vorhandenen Fracht in der mineralischen Fraktion vor Laugung der Shredder-Sande für ausgewählte Metalle	64
Tabelle 11: Ausbringen ausgewählter Metalle unter Einsatz 1 molarer HCl in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur	68
Tabelle 12: Schwermetallgehalte im Laugerückstand des Shredder-Sandes im Vergleich zu verschiedenen Grenzwerten der LAGA M 20, alle Angaben in mg/kg.....	70
Tabelle 13: Schwermetall- und Salzgehalte im wässrigen Eluat des Laugerückstands aus Shredder-Sand (Schütteleluat, Wasser/Feststoff = 10 : 1 l/kg).....	71
Tabelle 14: Metallgehalte in der Laugelösung während der Neutralisationsfällung in Abhängigkeit vom pH-Wert	77
Tabelle 15: Siebmetall-Analyse einer Shredder-Sand-Probe mit Korngrößen zwischen 1 und 5 mm	81
Tabelle 16: Beispielhafte Zusammensetzung dreier Proben aus Fällungsschlämmen („-, bedeutet nicht analysiert)	90
Tabelle 17: Gehalte ausgewählter Elemente und Glühverlust in den einzelnen Fraktionen sowie Anteil der Fraktionen an der Aufgabemenge	91
Tabelle 18: Ausbringen ausgewählter Elemente in den entsprechenden Fraktionen bezogen auf ein rechnerisch gemittelttes Ausgangsmaterial.....	92
Tabelle 19: Ausgangsdaten die der Ermittlung der zur Verfügung stehenden Input-Mengen und der daraus resultierenden Materialströme zugrunde liegen [SICON].....	94

Tabelle 20: Produktionsmengen der einzelnen Szenarien und die Umrechnungen auf Produktionskapazitäten nach unterschiedlichen Schichtsystemen [SICON]	95
Tabelle 21: Mengen pro Anlage für die beiden unterschiedlichen Szenarien (Szenario 1: eine zentrale Anlage im Dreischichtbetrieb; Szenario 2: drei dezentrale Anlagen im Dreischichtbetrieb) bezogen auf ein Jahr nach [SICON]	96
Tabelle 22: Auswahl rückgewinnbarer Metallfraktionen aus Fällungsschlämmen des Aufbereitungsverfahrens für Shredder-Sande in elementarer und oxidischer Form	97
Tabelle 23: Durchsatzbezogene Bestimmung der Anzahl der benötigten Maschinen unter Berücksichtigung der Materialmengen mit Rücklauf [SICON]	99
Tabelle 24: Massenbilanz mit zeitlichem Bezug nach [SICON]	100
Tabelle 25: Bestimmung der notwendigen Wassermenge im mechanischen Verfahrensteil einer Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage [SICON]	101
Tabelle 26: Bestimmung der notwendigen Wassermenge im nass-chemischen Verfahrensteil einer Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage und Summe für die Gesamtanlage [SICON] in Anlehnung an Tabelle 23	102
Tabelle 27: Gehalte ausgesuchter Elemente in den Abwässern bestimmter Verfahrensstufen zur Abschätzung der notwendigen Abwasserbehandlungsschritte	102
Tabelle 28: Berechnung der jährlichen Wasserverluste durch Ausschleusung von Wasser als Restfeuchte der Fraktionen	103
Tabelle 29: Übersicht der möglichen Wasserverbräuche für ein Maximal-Szenario und ein Minimal-Szenario	104
Tabelle 30: Zusammenstellung notwendiger Investitionen für eine Aufbereitungsanlage für Shredder-Sand ohne nass-chemische Aufbereitungsstufen [SICON]	106
Tabelle 31: Transportsituation beider Szenarien mit logistischer Mengenbestimmung [SICON]	110
Tabelle 32: Auflistung der für die aufgeführten Fraktionen angefragten Abnehmer nach Output-Fraktion [SICON]	112
Tabelle 33: Kosten und Erlöse, die der wirtschaftlichen Betrachtung zugrunde liegen nach [SICON]	113
Tabelle 34: Basisdaten und Annahmen zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit nach [SICON]	113
Tabelle 35: Jährliche Kostenabschätzung einer Aufbereitungsanlage für Shredder-Sand nach [SICON]	115
Tabelle 36: Vermarktungssituation von Shredder-Sanden unter den gemachten Randbedingungen nach [SICON]	116
Tabelle 37: Betriebsergebnisse, Amortisationszeiträume und ROI für unterschiedliche Szenarien der Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage nach [SICON]	117
Tabelle 38: Datengrundlage zur Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeit bei veränderlichem Annahmeerlösen von Shredder-Sand nach [SICON]	118

Tabelle 39: Zahlenbasis der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Abgabepreise von Eisen-Konzentraten nach [SICON].....	120
Tabelle 40: Zahlenbasis der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Kupfer-Konzentrationen und damit geänderter Abgabepreise des Kupfer-Konzentrates nach [SICON]	121
Tabelle 41: Zahlenbasis der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung veränderlicher Wasserverbrauchsmengen und den dadurch entstehenden Kosten nach [SICON]	123
Tabelle 42: Kostenabschätzung Szenario 1 [SICON].....	127
Tabelle 43: Kosten- und Erlössituation Szenario 1 [SICON]	128
Tabelle 44: Betriebsergebnis Szenario 1 [SICON]	128
Tabelle 45: Kostenabschätzung Szenario 2 [SICON].....	129
Tabelle 46: Kosten- und Erlössituation Szenario 2 [SICON]	130
Tabelle 47: Betriebsergebnis Szenario 2 [SICON]	130
Tabelle 48: Durch die Ökobilanz berücksichtigte Wirkungskategorien (vgl. [7])	135
Tabelle 49: Überblick über die ökobilanzielle Bewertung des Shredder-Sand-Recyclings (Basisvariante, Sensitivitätsanalysen und Referenzszenario) nach [7].....	137
Tabelle 50: Theoretische Potentialverbesserung der ökobilanziellen Wirkungskategorien durch die Nutzung wichtiger Metalle des Fällungsschlammes mit Vergleichswerten aus den Prozessstufen „Basis“ und „Erweitert“ [8]	139

1 Einleitung und Stand der Kenntnis

1.1 Einleitung und Problemstellung

Mit Beginn der 1970'er Jahre setzte in Deutschland eine Weiterentwicklung im Hinblick auf den Umgang mit Abfällen ein, die bis heute andauert. Statt von „zu entsorgenden Abfällen“, wird heutzutage häufig von „wiedereinsetzbaren Sekundärrohstoffen aus Abfällen“ gesprochen. Diese Weiterentwicklung spiegelt sich auch in den drei Stufen der abfallrelevanten Gesetzgebung Deutschlands wider: Während sich das im Jahre 1972 verabschiedete „Abfallbeseitigungsgesetz“ vor allem mit der Deponierung von Abfällen als Mittel zur Beseitigung beschäftigte, erfolgte ein erster Schritt hin zur Kreislaufführung durch das zuerst 1994 verabschiedete „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-AbfG). Hier wurde für die Behandlung von Abfällen die Kreislaufführung verankert und das Verursacherprinzip¹ eingeführt, während die neu eingeführte Abfallbehandlungshierarchie einen deutlichen Schritt weg von der reinen Beseitigung hin zur Verwertung machte. Im Jahre 2012 schließlich wurde das Gesetz in „Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen“ (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG) umbenannt und legt nun einen deutlichen Fokus auf die Bewirtschaftung von Abfällen. Durch eine neue Abfallbehandlungshierarchie und neue Begrifflichkeiten, wie z.B. erstmals die Definition des Begriffs „Recycling“, zielt das Gesetz deutlich auf die Kreislaufführung und nicht mehr auf die Beseitigung von Abfällen ab.

Doch nicht nur die frühe Erkenntnis der Schutzwürdigkeit der Umwelt durch den umweltverträglichen Umgang mit Abfällen ist von Bedeutung. Auch die Tatsache, dass Deutschland mittlerweile als rohstoffarmes, aber hochindustrialisiertes Land eingestuft werden muss, erklärt den fortgeschrittenen Stand der heute üblichen Techniken und Verfahren zum Recycling als Möglichkeit der Rohstoffrückgewinnung. Deutschland, als eines der produktionsstarken Länder Europas, muss viele der industriell eingesetzten Rohstoffe importieren. Allein für Metalle beliefen sich die Kosten der Importe der Bundesrepublik 2011 auf rund € 46,1 Mrd (siehe [10]). Diese für die Industrie entscheidenden Importe unterliegen

¹ Das Verursacherprinzip bezeichnet dabei, dass die Hersteller von Produkten auch nach der Nutzungsphase (Lebensspanne) des Produktes dafür verantwortlich sind, also wenn das Produkt zu Abfall wird. Dies gilt für Verpackungen ebenso wie für Altfahrzeuge.

in der Regel marktgemäßen Preisschwankungen, die durch Angebot und Nachfrage gesteuert werden. Am Beispiel der Preisentwicklung sogenannter Technologie-Metalle (Indium, Germanium, Lanthanoide etc.) der letzten Jahre kann gut nachvollzogen werden, wie sich eine gesteuerte Verknappung in der Verfügbarkeit von Rohstoffen auf die Marktsituation auswirken kann.

Es ist daher nachzuvollziehen, dass für das Wirtschaftswachstum der metallverarbeitenden Industrien eine weitgehende Entkopplung von Importen angestrebt wird, um zu einem gewissen Grad unabhängig von den Volatilitäten des internationalen Marktes zu sein. Durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen aus Schrotten und anderen „Abfällen“ wird schon seit Jahren der Einsatz von Primärrohstoffen substituiert. Hochwertige Recyclingprozesse konnten in Deutschland so im Jahr 2006 etwa 21,2 Mio. t Eisen- und Stahl, 350.000 t Kupfer, 221.000 t Blei, 97.000 t Zink und 796.000 t Aluminium aus Schrotten wieder in die Produktionskette zurückführen (vgl. [11]).

Um den Einsatz dieser Sekundärrohstoffe in Deutschland und der Welt weiter zu steigern, ist es notwendig, vorhandene und derzeit nicht oder nur rudimentär rezyklierte Stoffe und Stoffströme hinsichtlich der enthaltenen Wertstoffe zu analysieren und zielgerichtete Prozesse zu entwickeln, um die Wertstoffe weiter aufzubereiten. Die entstehenden Stoff-Konzentrate können dann nach Vorgabe von und in Abstimmung mit der verarbeitenden Industrie dieser wieder zur Verfügung gestellt werden. Die Güte und Aufbereitungstiefe der vorhandenen und eingesetzten Techniken variiert derzeit je nach Stoffstrom und Land teilweise frappierend. Die Rohstoffstrategie der Bundesrepublik Deutschland führt dazu aus:

„Bei einigen Materialien, z. B. Kupfer, hat Deutschland mit 54 % die höchste Recyclingquote weltweit (EU 45 %, USA 41 %, Welt 13 %). Die Recyclingraten anderer wichtiger Rohstoffe betragen 35 % bei Aluminium, 59 % bei Blei, 90 % bei Stahl, 20 bis 25 % bei Kobalt und 10 % bei Molybdän. Beachtliche Werte erreicht auch der Einsatz von Sekundärrohstoffen: von 45 % bei Stahl bis hin zu 94 % bei Glas. Die Verwertungsquoten der Hauptabfallströme liegen sämtlich deutlich über 60 %, bei Bau- und Abbruchabfällen erreichen sie 88 %. Altfahrzeuge werden zu 92,3 % verwertet, die Quoten für Verpackungsabfälle liegen je nach Material zwischen 68 % und 93 %“ (aus: [12]).

Im Bereich des Metallrecyclings und des Recyclings metall-assoziierten Stoffströme können für Deutschland also hohe Recycling-Quoten festgestellt werden. Sie basieren dabei nicht allein auf ökologischen oder ökonomischen Notwendigkeiten der Industrie, sondern werden in einigen Bereichen in der Gesetzgebung festgeschrieben. Durch die Integration der Produkthaftung in das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, Teil 3, §§ 23-27) und die damit verknüpften Verordnungen werden z.B. im Bereich der Fahrzeuge neben der

Rücknahmepflicht von Altfahrzeugen durch den Hersteller feste Verwertungs-Quoten für das Gesamtprodukt „Altfahrzeug“ vorgeschrieben: Diese waren bis Ende 2014 auf 85 M-% festgesetzt, wobei 80 M-% einer Wiederverwendung bzw. stofflichen Verwertung zugeführt werden mussten. Seit dem 1. Januar 2015 haben sich diese Anteile dahingehend verschoben, dass mindestens 95 M-% wiederverwendet bzw. verwertet werden müssen, wovon 85 M-% in Wiederverwendung und stofflicher Verwertung umgesetzt werden müssen (vgl. [13]).

Aus der entsprechenden Literatur (siehe z.B. [12]) kann geschlossen werden, dass für den Bereich der Fahrzeuge die geforderte Quote mit etwa 92 M-% nahezu erfüllt werden kann. Gerade aber die verbleibenden rund 3 M-% der Fahrzeugmasse stellen dabei eine besondere Herausforderung dar: Es müssen Rückstände einer Verwertung zugeführt werden, die bislang aufgrund der komplexen und heterogenen Zusammensetzung und der spezifischen Kornform noch nicht weiter aufgetrennt und damit zielgerichtet und hochwertig verwertet werden können.

Aus der Änderung der Gesetzgebung entstehen für die produzierenden Industrien, wie der Automobilindustrie, darüber hinaus neue Herausforderungen: Galt während der Gültigkeit des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes der untertägige Versatz noch als stoffliche Verwertung (KrW-AbfG, §4, Abs. 3), war die Beibehaltung dieses Sachverhaltes im Kreislaufwirtschaftsgesetz lange unklar. Durch die Änderungen im Gesetz war fraglich, ob das Verfüllen von inerten Reststoffen etwa im Bergeversatz noch als Recycling (entspricht der stofflichen Verwertung) im Sinne des Gesetzes gelten würde und wie sich das bei einer Revision der Altfahrzeug Verordnung auf diese auswirken würde. Für die geforderten Recyclingquoten von z.B. Altfahrzeugen wurden folglich weitere Aufbereitungsprozesse und Absatzwege für die erzeugten Materialströme gesucht. Hier setzen die Untersuchungen weiterführender Aufbereitungsverfahren für Shredder-Sande an, wie sie in der vorliegenden Arbeit entwickelt wurden.

Das Projekt „‘Shredder-Sand‘ - Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shredder-Sanden“ ist ein vom BMBF im Rahmen des Förderprogramms „r² - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Rohstoffintensive Produktionsprozesse“ geförderten Verbundprojekt von der Volkswagen AG, der SICON GmbH, der Recylex GmbH und der Technischen Universität Clausthal, Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD). Ziel war die Untersuchung zur Aufbereitung von Shredder-Sanden, um die Rückgewinnungsmöglichkeiten der darin enthaltenen feinkörnigen Metalle und der mineralischen Bestandteile zu maximieren. Im Fokus der Forschung stehen dabei Shredder-

Sande, wie sie bislang als Rückstandsfraktion einer Shredder-Rückstands-Aufbereitungsanlage, die nach dem VW-SiCon-Verfahren arbeitet, anfallen. Die vorliegende Promotionsarbeit wurde im Rahmen dieses Projekts erstellt und legt die erarbeiteten Verfahren, Ergebnisse und Aussichten für die Umsetzung dar. Die Arbeiten, die bei den Projektpartnern zu diesem Thema erstellt wurden, sind als solche gekennzeichnet. Ergebnisse aus Studien-, Bachelor-, Master- und Diplomarbeiten, die am IFAD im Rahmen des Projektes und damit der Promotionsarbeit unter speziellen Fragestellungen zur Untersuchung spezifischer Separationsverfahren vergeben und vom Verfasser der vorliegenden Arbeit betreut wurden, sind in die Erstellung dieser Arbeit eingeflossen.

1.2 Stand der Kenntnis

1.2.1 Entstehung von Shredder-Sand

Die Zerkleinerung von metallhaltigen Inputstoffen (ELV, weiße Ware, Mischschrotte u.ä.) mittels einer Shredder-Anlage ist das für diesen Abfallstrom gängige Aufbereitungsverfahren. Eine Shredder-Anlage umfasst dabei in der Regel die Anlageneinheiten einer Zerkleinerung in einem schnelllaufenden Hammerbrecher mit Siebboden, der Abtrennung der Leichtfraktion einschließlich der Abluftreinigung mittels Zyklon sowie die Auftrennung einer verbleibenden, nicht flugfähigen Fraktion mittels Magnetscheider. Der Vorgang führt zu drei neuen Fraktionen: Shredder-Schrott oder auch Stahlschrott-Fraktion (magnetische Materialien), Shredder-Schwerfraktion (SSF, auch NE-Metall-Vorkonzentrat) und Shredder-Leichtfraktion (SLF, auch „Shredder-Fluff“). Die SLF stellt dabei den wesentlichen Teilstrom des Input-Materials für die sogenannten Post-Shredder-Technologien, also die dem Shredder nachgeschalteten Aufbereitungsprozesse für nicht direkt einsetzbare Fraktionen (Shredder-Schrott und handgeklaupte kupferreiche Fraktion) dar. Je nach Auslegung kann die Aufbereitung der SSF zur Rückgewinnung der enthaltenen Metalle ebenfalls als Post-Shredder-Technologie bezeichnet werden. Im Allgemeinen wird aber nur die Aufbereitung der metallabgereicherten Rückstände dieser Prozessstufe der Post-Shredder-Technologie zugerechnet. Zur Unterscheidung von reinen Zerkleinerungsaggregaten, die auch im deutschen Sprachgebrauch als „Schredder“ bezeichnet werden, wird diese Anlage mit dem englischen Begriff „Shredder“ auch im deutschen Sprachraum verwendet.

Zur Behandlung der Shredder-Rückstände existieren einige Verfahrensansätze, die zu unterschiedlichem Grad in der Industrie ein- bzw. umgesetzt werden oder wurden. Allen im Folgenden aufgeführten Prozessen ist gemein, dass Shredder-Rückstands-Fraktionen aus

gemischtem Shredder-Input (Altfahrzeuge, weiße Ware und Mischschrotte) behandelt werden können. Alle Verfahren erzeugen eine Fraktion, die als Shredder-Sand der Korngröße < 5 mm angesehen werden kann. Diese Teilfraktion wird nicht weiter verwendet, sondern auf Deponien (sowohl als Deponat als auch als Deponiebaustoff) oder als Bergeversatzmaterial eingesetzt. Die in der Fraktion enthaltenen Wertstoffe werden so dem Stoffkreislauf entzogen.

In den zum Zeitpunkt des Projektantrags gängigen Post-Shredder-Technologien wie dem Reshment-Verfahren, dem Ebara Twin-Rec-Verfahren oder dem Citron-Verfahren [14] erfolgte keine oder nur eine sehr begrenzte Aufbereitung der Shredder-Rückstände bevor diese in thermischen Prozessen eingesetzt und in die Ausbrand-Fraktion ausgetrieben wurden. Unter den genannten Verfahren zielte nur das Citron-Verfahren auf eine weitgehende Rückgewinnung von NE-Metallen ab. Da bei diesem Ansatz allerdings die organischen Anteile nicht stofflich verwertet werden können, war das Verfahren nicht geeignet, die rechtlichen Anforderungen zur Quotenerfüllung aus der EU-Altfahrzeug-Richtlinie und der EU-Richtlinie über Elektroaltgeräte sicherzustellen. Die meisten Verfahren sind darüber hinaus nicht für eine Aufbereitung von Materialien im feinkörnigen Bereich, also mit Korngrößen unter 5 mm ausgelegt.

Mechanische Aufbereitungsverfahren für Shredder-Rückstände, wie das Scholz-Verfahren und das WESA-SLF-Verfahren, legen ihren Schwerpunkt auf die Gewinnung größerer Metall-Anteile (> 1 mm) und organikreicher Fraktionen. Die nicht weiter aufbereiteten Shredder-Sand-Fractionen werden im Bergeversatz oder auf Deponien eingesetzt (vgl. [15] und [16]). Spezielle Verfahren zur Rückgewinnung von definierter Kunststofffraktionen in der Körnung größer 10 mm und den Verfahrensansatz einer sensorgestützten Sortierung findet sich in [17].

Diese und weitere bekannte Shredder-Rückstands-Aufbereitungstechnologien sollen im Folgenden kurz dargestellt werden. Die dabei angegebenen Anteile entstehender Fraktionen beziehen sich auf die Gesamtmenge Material, die dem Prozess zugeführt wird.

Letztlich erfolgen Ausführungen zum VW-SiCon-Verfahren, auf dem die in dieser Arbeit vorgestellte Prozessentwicklung beruht.

1.2.1.1 Shredder Residue Treatment Line der Fa. Galloo

Das SRTL-Verfahren (SRTL = shredder residue treatment line) der Fa. Galloo gewinnt aus Shredder-Rückständen in einem mehrstufigen mechanischen Prozess metallische und kunststoffbasierte Fraktionen. Durch Prallmühlen werden die Shredder-Rückstände

zerkleinert und mit Trennverfahren nach Dichte und Form klassiert und in einem Reinigungsschritt behandelt. Die so erzeugten Fraktionen sind eine Mineral-Fraktion (ca. 40 M-%), eine sog. „Leicht-Fraktion“ (ca. 30 M-%), eine sog. „Schwer-Fraktion“ (ca. 15 M-%) und eine Kunststofffraktion (ca. 10 M-%). Die verbleibenden 5 M-% des Materials sind ein Rückstand aus PVC, Steinen und NE-Metallen, die voneinander getrennt und verwertet werden können. Durch den spezifischen Aufbau, der eine erweiterte Aufbereitung der Kunststofffraktionen zulässt, werden auch Kunststoffe aus anderen Quellen in diesen Prozess eingespeist. Sowohl Mineral- als auch Leichtfraktion werden nicht weiter aufbereitet, sondern auf Deponien verbracht und die Schwerfraktion wird nach der Abtrennung metallischer Bestandteile energetisch verwertet [18].

1.2.1.2 SULT-Verfahren

Das SULT-Verfahren kombiniert Siebung mit Dichtentrennstufen, um metallische, mineralische und organische Bestandteile voneinander zu trennen. Durch weiterführende Aufbereitungsschritte der Organikfraktion kann eine Kunststofffraktion erzeugt werden, die wieder zur Herstellung von Kunststoffprodukten eingesetzt werden kann. Die verbleibende Organikfraktion kann als Reduktionsmittel in Elektro-Lichtbogenofen eingesetzt werden. Die Massenanteile der Grundprodukte aus diesem Prozess, wie sie in der Literatur (s. [19]) angegeben werden, sind etwa 3 M-% Kupfer, 7 M-% Stahl und 50 M-% Organik. Zusätzlich wird aus dem Input eine Mineralik-Fraktion erzeugt (15-20 M-%), die allerdings ebenfalls nicht weiter behandelt und als Deponie-Material abgegeben wird. Die verbleibenden 20 M-% werden als Wasser angegeben, das als Dampf dem Prozess entweicht. Nach Stand der Kenntnis gibt es in der EU keine Anlage, die nach dem SULT-Verfahren arbeitet. Die Technik wird allerdings von R-Plus (s. dort) als Post-Shredder-Technik in den eigenen Anlagen als Teilprozess eingesetzt [19].

1.2.1.3 R-Plus-Prozess

Durch die Verschaltung von Siebstufen mit Dichtentrennstufen werden im R-Plus-Prozess der R-Plus Recycling GmbH drei Hauptfraktionen erzeugt: eine mineralische Fraktion (ca. 35 M-%) zum Einsatz als Baustoff, eine metallische Fraktion (ca. 5 M-%) als Einsatz für Schmelz- und Hüttenwerke und eine hauptsächlich aus organischen Bestandteilen bestehende Fraktion (ca. 60 M-%) zum Einsatz in der energetischen Verwertung [14]. Dieser Prozess basiert, wie bereits oben angegeben, auf dem SULT-Verfahren. Nach [19] wird hier allerdings keine Wirtschaftlichkeit erreicht, da nur rund 5 M-% des Inputs in ein marktgängiges Metallkonzentrat überführt werden können.

1.2.1.4 Scholz- Verfahren mit nachgeschalteter Kunststoffsortierung

Das Scholz-Galloo-Verfahren gewinnt aus Shredder-Schwerfraktionen und Shredder-Leichtfraktionen kleiner als 300 mm sowohl unterschiedliche Metallfraktionen zum Wiedereinsatz als auch Sekundärbrennstoffe und unterschiedliche Kunststofffraktionen zurück. Durch Verschaltung von Magnetscheidung, Siebklassierung, Wirbelstromscheidung und Sichtung können dabei unterschiedliche metallische und nicht metallische Fraktionen erzeugt werden. Die Fraktionen < 2 mm werden hier als Shredder-Sand ausgeschleust und nicht weiter verwertet [20].

Eine erweiterte Verfahrensvariante kann durch Nachschaltung von Dichtentrennstufen für den Bereich der Kunststoffaufbereitung dabei auch Kunststoffkonzentrate für die stoffliche Verwertung und als hochwertiger Ersatzbrennstoff erzeugt werden [21]. Diese Verfahrenserweiterung wurde mit der kunststoffverarbeitenden französischen Fa. Galloo entwickelt.

1.2.1.5 Ebara Twin-Rec-Verfahren

Das Ebara Twin-Rec-Verfahren zählt zu den thermischen Verwertungsverfahren. Durch die Vergasung der organischen Bestandteile verbleibt eine Fraktion aus Metallen und inerten Stoffen. Das Prozessgas und die Verkohlungsrückstände werden genutzt, um die entstandene Asche zu verglasen und so für den Einsatz als Baustoff zu inertisieren. Die zurückgebliebenen Metalle werden zuvor abgetrennt und an weiterverwertende Betriebe abgegeben. [14].

1.2.1.6 „WESA-SLF-Verfahren“

Das „WESA-SLF-Verfahren“ der Fa. LSD GmbH basiert auf den trocken-mechanischen Aufbereitungsschritten Zerkleinerung, Siebung und Sichtung und erzeugt dadurch vier verwertbare Fraktionen. Zum einen werden zwei hüttengängige Metallfraktionen erzeugt: ein Eisenkonzentrat mit einem Eisenanteil von etwa 95 M-% sowie ein Kupferkonzentrat. Zum anderen werden eine heizwertreiche organische Fraktion erzeugt (Heizwert > 23 MJ/kg) und eine Sandfraktion, bestehend aus metallischen und mineralischen Anteilen, die zur weiteren Aufbereitung und Verwertung, speziell zur Rückgewinnung der noch vorhandenen groben Metallanteile, an entsprechende Unternehmen abgegeben wird [22].

1.2.1.7 VW-SiCon-Verfahren

Das Volkswagen-SiCon-Verfahren beinhaltet bereits grundlegende Aufbereitungsschritte für die Veredelung von Shredder-Sanden [23], [24]. Diese zielen im Wesentlichen auf den

kombinierten Einsatz von Mineralstoffen und Metallen in der Sekundär-Kupfermetallurgie ab. Das Volkswagen-SiCon-Verfahren kann grob skizziert auf zwei Prozessstufen zurückgreifen (s. Abbildung 1): Zum einen den Hauptprozess der Shredder-Rückstands-Aufbereitung und zum anderen auf nachgeschaltete kundenspezifische Veredlungsschritte.

Durch die Kombination von Zerkleinerungs-, Klassier-, Sortier- und Waschstufen können durch das Verfahren aus den Shredder-Leichtfraktionen fünf neue Fraktionen hergestellt werden [25]: Shredder-Granulat (veredelt), Shredder-Flusen (veredelt), Metalle, PVC-reiche Kunststofffraktion und Shredder-Sand (veredelt). Shredder-Granulat ist eine PVC-arme Kunststofffraktion, die als Reduktionsmittel in Hochöfen einsetzbar ist. Shredder-Flusen oder auch „Fluff“ kann z.B. als Entwässerungshilfsmittel für Klärschlamm eingesetzt werden und steigert die Energieeffizienz der Klärschlammverbrennung. Die metallhaltigen Fraktionen können zum direkten Einsatz an Hüttenbetriebe abgegeben werden. Die PVC-reiche Fraktion kann im Vinyloop-Prozess der Firma Solvay zur Herstellung eines PVC-Recykats eingesetzt werden. Der Shredder-Sand ist eine mineralisch-metallische Mischfraktion mit Anteilen von organischen Bestandteilen, der derzeit noch als Material zum untertägigen Versatz genutzt wird.

Gemäß den ursprünglichen Planungen der Entwicklungen im Volkswagen-SiCon-Verfahren sollten Mineralstoffe sowie Eisen und Buntmetalle gemeinsam als Schlackenbildner und Metallträger bei der Verhüttung von kupferreichen Schrotten eingesetzt werden. Der dafür erforderliche geringere Aufbereitungsaufwand wäre trockenmechanisch darstellbar gewesen; das Wegbrechen großer Ströme kupferreicher Schrotte durch den Export nach Asien führte allerdings dazu, dass die Sekundär-Kupferhütten ihre Prozesse auf die Verarbeitung anderer Vorstoffe umstellen mussten. Damit fiel auch der Absatzkanal für den derart aufbereiteten Shredder-Sand weg.

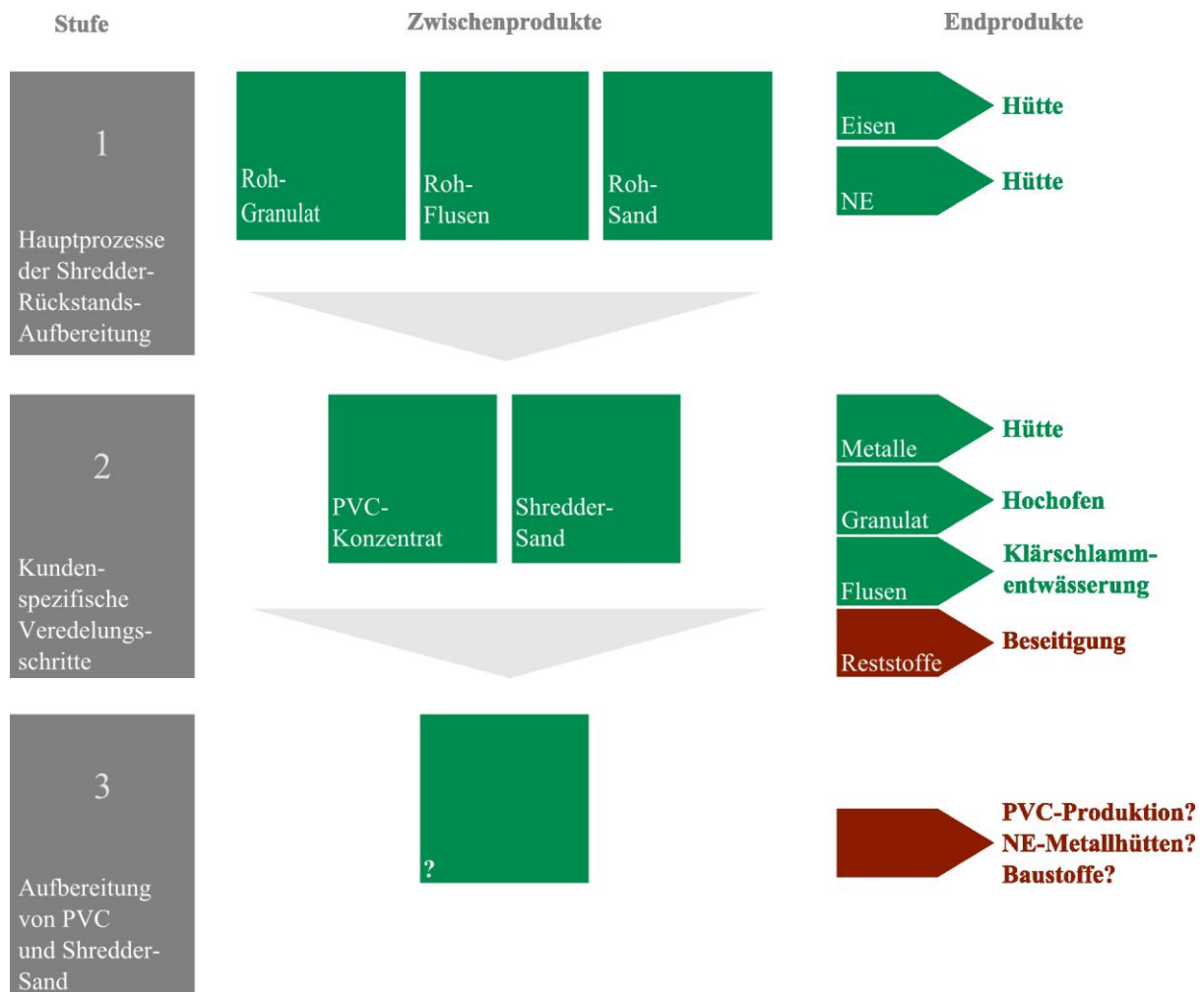


Abbildung 1: Verfahrensstufen, Stoffströme und Absatzwege im Volkswagen-SiCon-Verfahren

Neuere Entwicklungen bei Metallseparatoren im Allgemeinen und Wirbelstromscheidung sowie bei sensorgestützter Sortiertechnik im Besonderen zeigen, dass eine weitgehende NE-Metallabtrennung aus Shredder-Sanden im Kornbereich zwischen 5 mm und 1 mm auf einem dieser Wege erreicht werden kann. Im Kornbereich < 1 mm, der einen erheblichen Teil (ca. 61 M-%) der Sandfraktion ausmacht, können diese Technologien jedoch aufgrund des unterschiedlichen Trennverhaltens (begründet in der Korngröße) nicht zielführend eingesetzt werden. Eine gezielte Ausschleusung noch vorhandener Wertstoffe konnte zum Zeitpunkt des Projektstarts nicht effizient erfolgen und die Wertstoffe wurden bei der Verbringung dem Stoffkreislauf entzogen.

1.2.1.8 Andere Verfahren

Zu anderen Verfahren, wie z.B. dem Salyp-Verfahren, dem Comet-Sambre-Verfahren oder dem MBA-Polymers-Verfahren konnten keine Daten zu Umsetzung oder Betriebsweise gefunden werden. Es wird in der entsprechenden Literatur davon ausgegangen, dass diese Verfahren nicht in der Praxis umgesetzt werden [26].

1.2.2 Anfall an Shredder-Rückständen und Shredder-Sand

Die Verwertung von Altfahrzeugen, Elektroaltgeräten und leichtem Mischschrott hat seit der Jahrtausendwende eine erhebliche Weiterentwicklung erfahren. Während 1993 die anfallenden rund 450.000 t Shredderrückstände [27] durchgängig deponiert wurden, konnten in den folgenden Jahren mehr und mehr der enthaltenen Materialien identifiziert und gezielt zur weiteren Verwertung ausgeschleust werden. Im Jahre 2010 wurde die statistische Erhebung daher ausdifferenziert und auf die Shredder-Leichtfraktion fokussiert. Der Gesamtanfall dieser im Shredder-Prozess entstehenden Teilfraktion belief sich auf 436.000 t [28].

Durch moderne Verfahren zur Verwertung von Shredder-Rückständen verbleibt heutzutage in vielen Verfahren ein überwiegend mineralischer Abfallstrom mit Restgehalten an NE-Metallen im Feinkornbereich ($< 5 \text{ mm}$), der bereits als Shredder-Sand bezeichnet wird, zurück. Obwohl von geringerer Menge als die ursprünglich beseitigten Shredder-Rückstände, sind die potentiellen Gesamtmengen an Shredder-Sanden nicht unerheblich. Je nachdem, ob weitere Behandlungsschritte vorgenommen werden, können in Deutschland rechnerisch jährlich zwischen 60.000 t und 100.000 t mit Korngrößen $< 5 \text{ mm}$ erzeugt werden. Die unterschiedlichen Mengen entstehen durch unterschiedliche Behandlungsschritte des Shredder-Rückstandes: Bei der Aufbereitung der Shredder-Leichtfraktion ausschließlich durch Absiebung des Feinkorns und Abtrennung der Metalle aus dem Siebüberlauf bildet der Siebunterlauf den Shredder-Sand (ca. 60.000 t). Bei einer vertieften Aufbereitung mittels z.B. dem Volkswagen-SiCon-Verfahren werden durch zusätzliche Zerkleinerungs- und Separationsstufen zusätzliche Mengen an Material der entsprechenden Korngröße erzeugt, die als Siebunterlauf abgetrennt werden (ca. 100.000 t). Nach der Abtrennung der Korngrößen $> 1 \text{ mm}$ entstehen aus diesem Vormaterial je nach Vorbehandlung etwa 35.000 t bzw. bis 60.000 t Shredder-Sande des Kornbandes $< 1 \text{ mm}$.

1.2.3 Rechtliche Grundlagen zur Behandlung von Shredder-Sand

Die Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments hat für eine engere Definition des Begriffs Recycling gesorgt. Bis zu diesem Zeitpunkt war im deutschen Recht (KrW-AbfG) nur der Begriff der „stofflichen Verwertung“ definiert, der in der zu Beginn der Arbeit gültigen Fassung die Verbringung unter Tage als Füllmaterial mit einschließt. In der Richtlinie wird nun der Begriff Recycling definiert als

"[...] jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfallmaterialien zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, aber nicht die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind." (aus [29]).

Durch den Wegfall der Möglichkeit, den Einsatz von Shredder-Sanden als Füllmaterial im untertägigen Versatz als Recycling zu deklarieren, muss der Shredder-Sand mit Hinblick auf die Erfüllung der Verwertungsquoten einer neuen Bestimmung zugeführt werden, wenn die entsprechende Definition auch in einer nächsten Revision der Altfahrzeugverordnung auf diese durchschlägt.

Aufgrund der Produkthaftung, wie sie im Kreislaufwirtschaft Gesetz definiert ist, und durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Gesetzesgrundlagen (z.B.: [13], [30] u.ä.), stellen sich für die Hersteller der Produkte neue Anforderungen und Herausforderungen: Der Erzeuger eines Produktes ist verpflichtet, auch die Post-Consumer-Verwertung (Verwertung nach Nutzung) der Produkte zu begleiten. Am Beispiel eines Fahrzeugherstellers lassen sich die so entstehenden Verkettungen von Verantwortlichkeiten am besten darstellen:

Im KrWG §23, Abs. 2, Satz 5 wird als Teil der Produkthaftung die Rücknahme- und Verwertungspflicht der Hersteller definiert:

„[...] die Rücknahme der Erzeugnisse und der nach Gebrauch der Erzeugnisse verbleibenden Abfälle sowie deren nachfolgende umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung [...]“ (s. [29])

Damit und mit der Spezifizierung in der „Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen“ (AVV, s. [13]) ist der Hersteller des Fahrzeugs verpflichtet, einen umweltverträglichen Weg der Entsorgung seiner Produkte zu garantieren. In der AVV § 5, Abs. 1 werden genaue Verwertungsquoten für Altfahrzeuge vorgegeben:

„(1) Die Wirtschaftsbeteiligten stellen sicher, dass bezogen auf das durchschnittliche Fahrzeugleergewicht aller pro Jahr überlassenen Altfahrzeuge folgende Zielvorgaben erreicht werden:

1. *spätestens ab 1. Januar 2006*
 - a. *Wiederverwendung und Verwertung mindestens 85 Gewichtsprozent,*
 - b. *Wiederverwendung und stoffliche Verwertung mindestens 80 Gewichtsprozent und*
2. *spätestens ab 1. Januar 2015*
 - a. *Wiederverwendung und Verwertung mindestens 95 Gewichtsprozent,*

b. Wiederverwendung und stoffliche Verwertung mindestens 85 Gewichtsprozent.“ [13]

Solche Rücknahmepflichten und Quoten werden auch in anderen Bereichen definiert, z.B. bei Elektro- und Elektronikgeräten (Rücknahmepflicht: ElektroG, § 10, Abs. 2 [31], Verwertungsquote: ElektroG, § 12) [31].

Da nicht geklärt ist, wie sich die Definitionen der Begriffe Recycling und stoffliche Verwertung zukünftig entwickeln, bleibt die grundsätzliche Frage einer nachhaltigen stofflichen Verwertung von Shredder-Sanden bestehen.

Neben den rechtlichen Grundlagen zur Verwertungspflicht aus Altprodukten wurde für den Wiedereinsatz der Shredder-Sande bereits bei Projektstart die Abgabe einer Teilfraktion in den Bereich der Recycling-Baustoffe vorgesehen. Dafür mussten entsprechende rechtliche Quellen und die entsprechenden Grenzwerte für den Wiedereinsatz identifiziert werden. Hier wurde zum Zeitpunkt der Projektinitiierung die Mitteilung 20 der LAGA angewandt. Die während des Projektes in der Entwicklung befindliche „Mantelverordnung“ wurde dabei besonders hinsichtlich der Ersatzbaustoff-Verordnung berücksichtigt. Durch das nach wie vor in Schweben befindliche Gesetzgebungsverfahren finden die darin definierten Grenzwerte und Bestimmungen allerdings zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch keine Anwendung auf die Produkte des hier beschriebenen Verfahrens. Für einen Einsatz als Recycling-Baustoff würde daher eine auf der Mitteilung 20 basierende Einzelfallprüfung des Materials durch den DIBt-Sachverständigenausschuss „Gesundheits- und Umweltschutz“ erfolgen müssen.

Das Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (kurz: Bundes-Immissionsschutzgesetz, „BImSchG“) regelt u.a. die Genehmigungspflichten von Abfallaufbereitungsanlagen. Im Rahmen des Projektes wurde für die hier geplante Anlage auch eine Überprüfung des Genehmigungsverfahrens nach BImSchG durch SICON durchgeführt. Um die Unterschiede genehmigungsrechtlicher Art zwischen einer Aufbereitungsanlage ohne und einer Aufbereitungsanlage mit nass-chemischer Behandlungsstufe aufzeigen zu können, wurden beide Sachverhalte abgefragt. Genehmigungsrechtlich ergeben sich für die beiden möglichen Verfahrensführungen gravierende Unterschiede.

Das Gesetz stellt Anforderungen an alle Anlagen: Bestimmte Anlagen unterliegen wegen ihres erhöhten Gefahrenpotentials einer Genehmigungspflicht mit erhöhten Anforderungen (siehe genehmigungsbedürftige Anlagen, BImSchG § 4 Abs. 1). Diese Anlagen sind nicht im Gesetz selbst aufgeführt, sondern in der 4. Verordnung zur Durchführung des Bundes-

Immissionsschutzgesetzes (4. BImSchV) abschließend in einer Liste verschiedener Anlagentypen gelistet; dabei ist häufig die Größe oder der Produktionsdurchsatz einer Anlage, das heißt das Überschreiten bestimmter Schwellenwerte hinsichtlich Schadstoffausstoß, Stoffdurchsatz, Kapazität, eingesetzter chemischer Stoffe oder ähnlichem, maßgeblich dafür, ob sie der Genehmigungspflicht unterliegt oder nicht.

Das Genehmigungsverfahren nach dem BImSchG behandelt sämtliche Umweltauswirkungen einer Anlage. Auf die Genehmigung besteht ein Rechtsanspruch gem. BImSchG § 6 Abs.1. Das förmliche Genehmigungsverfahren für die Neuerrichtung bestimmter Anlagen ist grundsätzlich öffentlich (Auflistung dieser Anlagen in Spalte 1 im Anhang zur 4. BImSchV). Dies bedeutet, dass der Antrag auf eine Genehmigung öffentlich bekanntgemacht wird und die Gelegenheit besteht, bei der Genehmigungsbehörde Einwendungen gegen das Vorhaben zu erheben. Diese Einwendungen können von jedermann bis 2 Wochen nach Ablauf der Auslegungsfrist erhoben werden. Für bestimmte andere Neuanlagen ist das Genehmigungsverfahren nicht öffentlich (sog. einfaches Verfahren) und wird nach BImSchG §19 geregelt. Diese Anlagen sind in Spalte 2 im Anhang zur 4. BImSchV aufgeführt.

Tabelle 1: Vergleich der Genehmigungsverfahren nach BImSchG

	Förmliches Genehmigungsverfahren	Einfaches Genehmigungsverfahren
Betroffene Anlagen	Spalte 1 (Anhang zur 4. BImSchV)	Spalte 2 (Anhang zur 4. BImSchV)
Regelung im BImSchG	§§ 10 ff.	§ 19
Öffentlichkeitsbeteiligung	Ja	Nein
Genehmigungsdauer ab Vorlage aller Unterlagen	6-7 Monate	2-3 Monate

Nur die im Anhang der 4. BImSchV aufgeführten Anlagen bedürfen bei Neubau oder wesentlicher Änderung (einer schon bestehenden Anlage) einer Genehmigung nach dem BImSchG (Neubau nach BImSchG § 4, wesentliche Änderung nach BImSchG § 16). Anlagen, die nicht im Anhang der 4. BImSchV aufgeführt sind (also nicht nach dem BImSchG genehmigungsbedürftig sind), benötigen in der Regel eine Baugenehmigung.

In der 9. BImSchV werden Details des Genehmigungsverfahrens festgelegt: Schriftlicher Antrag, Verfahrensart (öffentliches / nichtöffentliches Verfahren / vorzeitiger Beginn), Umfang der Antragsunterlagen (z.B. Bau-/Betriebsbeschreibung, Auszug aus Flurkarte,

Lagepläne, Angaben über Emissionen und Emissionsminderungen sowie Maßnahmen zum Arbeitsschutz), Durchführung des Genehmigungsverfahrens, Beteiligung Dritter (Öffentlichkeit), Durchführung und Protokollierung des öffentlichen Erörterungstermins, Inhalt der Genehmigung, besondere Bescheide.

Sofern in den Durchführungsverordnungen keine Grenzwerte für Emissionen bzw. Immissionen festgelegt sind, gelten die Werte aus den bundeseinheitlichen Verwaltungsvorschriften wie der TA Luft (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft) und der TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm).

Für den Immissionsbereich "Licht" besteht derzeit noch keine ausführende Bundesverordnung; hierfür gilt jedoch in den Bundesländern die "Licht-Richtlinie" der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI). Für Gerüche gilt länderspezifisch die "Geruchsimmissions-Richtlinie".

Die Genehmigung gewährt dem Anlagenbetreiber Rechtssicherheit nicht nur in öffentlich-rechtlicher, sondern auch in privatrechtlicher Hinsicht: mit ihrer Erteilung sind die nachbarrechtlichen Ansprüche auf Beseitigung und Unterlassung von Immissionen (z.B. durch BGB § 906) beschränkt; der vom Betrieb der genehmigten Anlage beeinträchtigte Nachbar kann die Einstellung des Betriebes nicht mehr verlangen (BImSchG § 14).

Der genaue Umfang der Unterlagen bestimmt sich durch die 9. BImSchV. Die Antragstellung hat grundsätzlich schriftlich bei der zuständigen Genehmigungsbehörde zu erfolgen (§ 2 der 9. BImSchV). Die zuständigen Behörden sind die Gewerbeaufsichtsämter (z.B. in Niedersachsen) oder die Untere Abfallbehörde des Kreises/der Stadt (z.B. in Nordrhein-Westfalen). Weitere für die Beurteilung der Genehmigung beteiligte Behörden (z.B. Bauaufsichtsamt) werden von der Antragsbehörde involviert und sind nicht separat vom Antragsteller zu kontaktieren. Antragsteller ist der Träger des Vorhabens, nicht zwangsläufig der spätere Betreiber. Die antragsempfangende Behörde soll die Genehmigung nicht nur bescheiden, sondern dem Antragsteller auch beraten und aufkommende Fragen beantworten. Eine Vorbesprechung mit Erläuterung des Vorhabens und Klärung der notwendigen Unterlagen ist im Regelfall empfehlenswert.

Der Antragsinhalt richtet sich nach § 3 der 9. BImSchV, die Antragsunterlagen sind in den §§ 4 und 4a-4e der 9. BImSchV geregelt. Hier sind insbesondere die Absätze 2 und 3 des § 4 zu berücksichtigen, wonach gesonderte Unterlagen bereitzustellen sind, wenn es sich um ein Vorhaben handelt, welches nach Vorschriften über Naturschutz und Landschaftspflege

geregelt ist. Hierzu zählen insbesondere Angaben über Maßnahmen zur Vermeidung, Verminderung oder zum Ausgleich erheblicher Beeinträchtigungen von Natur und Landschaft sowie über Ersatzmaßnahmen bei nicht ausgleichbaren, aber vorrangigen Eingriffen in diese Schutzgüter. Außerdem ist eine für die Auslegung geeignete Kurzbeschreibung des Vorhabens vorzulegen, die einen Überblick über die Anlage, ihren Betrieb und die voraussichtlichen Auswirkungen auf die Allgemeinheit und die Nachbarschaft ermöglicht. Zusätzlich ist ein Verzeichnis aller Anhänge anzufertigen und es ist zu kennzeichnen, welche Angaben als Geschäfts- oder Betriebsgeheimnis angesehen werden.

Die Angaben zur Anlage müssen die Anlagenteile, Verfahrensschritte und Nebeneinrichtungen beschreiben und den Bedarf an Grund und Boden (Geländeplanung) enthalten. Wesentlich sind auch Massenbilanzen und die Angaben zu Einsatzstoffen, Zwischen-, Neben- und Endprodukten sowie Abfällen. Bei möglichen Freisetzen oder Reaktionen von Stoffen durch Störungen sind auch diese anzugeben, neben den grundsätzlichen Angaben zu Emissionen, die voraussichtlich von der Anlage ausgehen werden. Können schädliche Umwelteinwirkungen auftreten, sind entsprechende Prognosen und Immissionswerte (Art, Ausmaß, Dauer) anzugeben.

Energietechnisch sind die in der Anlage verwendeten und anfallenden Energien anzugeben sowie eine Effizienzanalyse anzufertigen mit Angaben über Möglichkeiten zur Erreichung hoher energetischer Wirkungs-/Nutzungsgrade und zur Einschränkung von Energieverlusten.

Die Unterlagen müssen außerdem Angaben zu den Umweltschutzmaßnahmen (siehe § 4b der 9. BImSchV) und einen Plan zur Behandlung der Abfälle (§ 4c) enthalten.

Die Ergebnisse der Prüfung für die beiden hier betrachteten Verfahrenswege sind in Kapitel 6.2 zusammengefasst.

2 Vorarbeiten

2.1 Analytische Vorcharakterisierung des Ausgangsmaterials

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Shredder-Sande sind eine Teilfraktion der Shredder-Sande < 5 mm aus dem VW-SiCon-Verfahren aus einer üblichen Vorlaufmischung von Shredder-Rückständen. Zur vollständigen Charakterisierung wurde dieses Material einer umfassenden Untersuchung unterzogen:

Der durchschnittliche Feuchtegehalt, ermittelt gegenüber der Trockenmasse nach einer Trocknung, bei 105 °C konnte auf 18,5 M-% bestimmt werden. Dieses Material ist bei entsprechender Siebtechnik (Taumel-, Vibrations- oder Wurfsiebe) bereits in trocken betriebenen Siebmaschinen siebgängig.

Für eine möglichst umfassende Analyse wurden Teilproben des getrockneten Ausgangsmaterials < 5 mm gemahlen und entsprechend der zu detektierenden Elemente analysiert. Die gemittelten Ergebnisse ausgewählter Elemente sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Eine ausführliche Darstellung der Analyse-Methoden findet sich in Kapitel 2.4.

Tabelle 2: chemische Analyse ausgewählter Elemente einer Shreddersandprobe < 5 mm

Element	Anteil / M-% ²	Element	Anteil / M-% ²
Aluminium	1,925	Natrium	1,545
Barium	0,455	Nickel	0,100
Calcium	4,315	Phosphor	0,655
Cobalt	0,015	Blei	0,155
Chrom	0,135	Silizium	10,945
Kupfer	2,105	Zinn	0,035
Eisen	27,140	Titan	1,000
Kalium	0,280	Vanadium	0,010
Lithium	0,010	Wolfram	0,040
Magnesium	0,850	Zink	1,480
Mangan	0,295	Sonstige Bestandteile	46,495
Molybdän	0,015		

2.2 Wissenschaftliche Vorarbeiten zur Aufbereitung von Shredder-Sanden

Da Shredder-Sande Restfraktionen noch relativ junger Technologien sind, die sich zu Projektbeginn gerade am Markt etablierten, waren nur wenige Forschungsarbeiten zur weiteren Behandlung und Verwertung der Rückstände aus der Behandlung des Stoffstroms „Shredder-Rückstand“ bekannt.

Als wissenschaftliche Vorarbeiten, die sich grundsätzlich mit dem gleichen Material, allerdings unter anderen Rahmenbedingungen beschäftigt haben, können zwei Arbeiten bezeichnet werden: Während sich [1] auf die Ermittlung möglicher Behandlungsstufen anhand einer Shredder-Sandprobe aus einer älteren VW-SiCon-Verfahrensvariante fokussiert, wird in [2] das Potential der Shredder-Sande hinsichtlich eines bestimmten enthaltenen Metalls (Zink) untersucht. Beide Arbeiten enthalten in gewissem Umfang Materialcharakterisierungen und Beobachtungen, die für diese Arbeit relevant wurden.

Durch Untersuchungen an trockenen Aufbereitungsaggregaten konnte durch [1] unter Berücksichtigung des Korngrößenbandes der Shredder-Sande der trockene Verfahrensweg zunächst als nicht zielführend ausgeschlossen werden. Die Verfahrensführung im nassen

² gemittelt in Shredder-Sanden mit Korngrößen < 5mm

Milieu wurde verfolgt. So werden bereits die möglichen Aufbereitungsstufen von Nass-Trenntisch, Mahlung, Siebung und Laugung als gangbarer Weg (s. Abbildung 2) identifiziert.

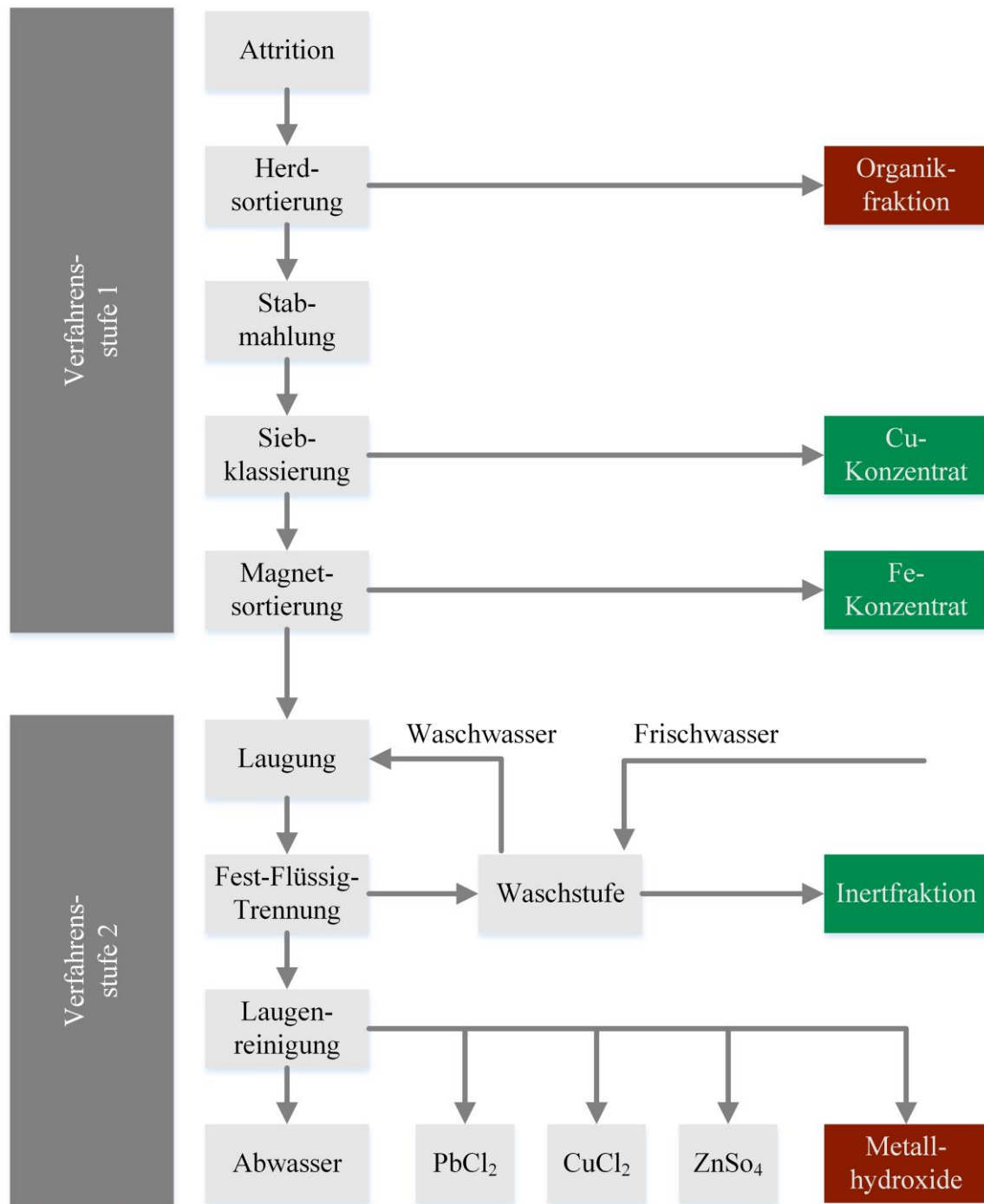


Abbildung 2: Verfahrensidee aus [1]

In [1] wird die Abtrennbarkeit der Organik mittels Nassherd herausgestellt, wobei die organischen Bestandteile der Shredder-Sande hierbei nicht in textile und nichttextile Anteile unterteilt werden. Durch die Veränderungen in der Zusammensetzung der in der Arbeit betrachteten Shredder-Sande zu den heute üblichen Shredder-Sanden, kann die in der entsprechenden Arbeit gewählte Vorgehensweise nicht übertragen werden. Heutige Shredder-

Sande haben zudem deutlich höhere Anteile an feinkörnigen Eisenphasen. Somit wird eine geänderte Verfahrensführung notwendig, die übermäßigen Materialdurchsatz durch nicht dafür notwendige Aggregatstufen verhindert. Auch die Abtrennung der textilen Anteile durch eine einzelne Nass-Trenntisch-Stufe ist für aktuelle Shredder-Sande unzureichend.

Die Vorarbeit in [2] stellt mögliche Entwicklungen im Zink-Gehalt von Shredder-Sanden dar (s. Abbildung 3). Hier wurde durch Marktanalysen und Befragung führender Hersteller im Bereich Fahrzeuge, Haushaltsgroßgeräte, Baustoff, Verzinkung und Bearbeitung verzinkter Werkstoffe eine Prognose entwickelt, mit dem Ziel, den Zink-Gehalt in Shredder-Sanden für die nächsten Jahre zu prognostizieren.

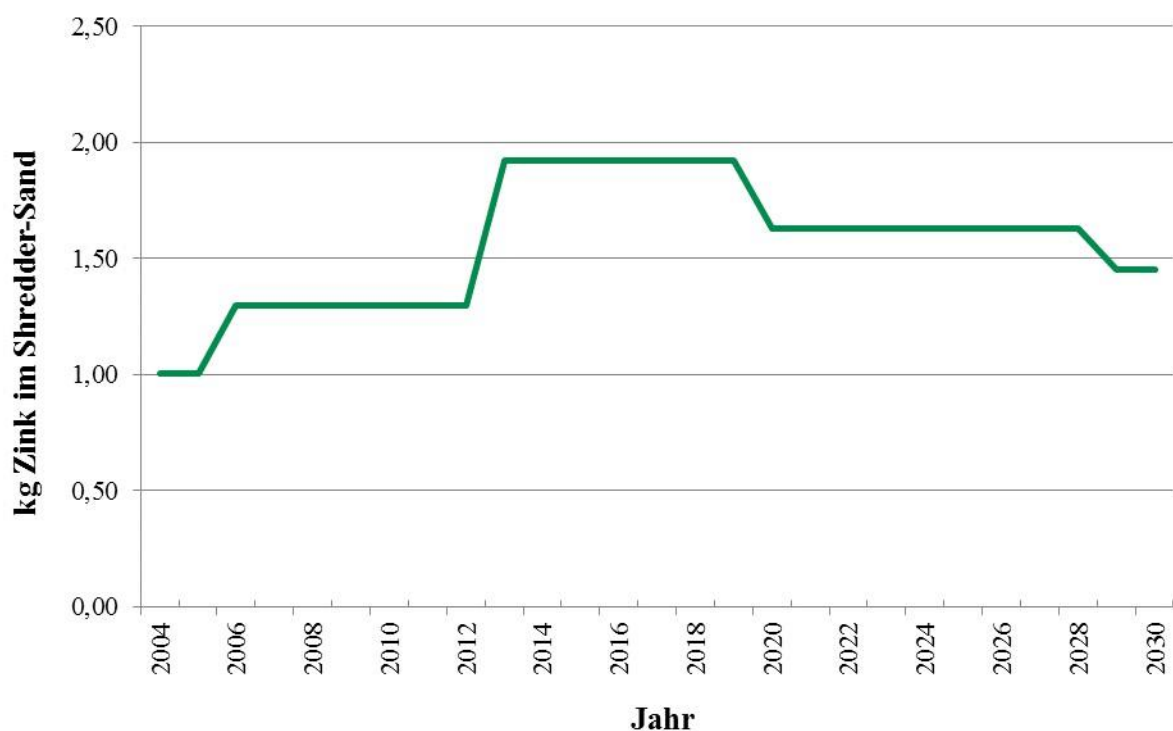


Abbildung 3: Entwicklung des Zinkanteils im Shredder-Sand < 1 mm für eine Tonne Standard-Input-Mischung nach [2]

Bei dieser Arbeit wurde folglich zunächst nur das stoffliche Potential der Shredder-Sande untersucht und grundlegende Materialcharakterisierungen getroffen, die sich bereits auf aktuellere Shredder-Sand-Zusammensetzungen beziehen. Unberücksichtigt bleiben mussten dabei Schwankungen in der Zusammensetzung, die durch Änderungen im Input-Mix verursacht werden. Hier können Gesetzesänderungen, Metallpreise, Änderungen der vorgeschalteten Behandlungsstufen etc. starken Einfluss haben.

2.3 Probennahme der Untersuchungsproben

Den bereits erwähnten Veränderungen in der Zusammensetzung von Shredder-Sanden Rechnung tragend, wurde eine eigene Kampagne an der Shredder-Anlage der Firma Belgian Scrap Terminal (BST) in Belgien durchgeführt, um repräsentative Proben in ausreichender Menge zu erzeugen. Da moderne Shredder allein mit ELV nicht ausgelastet wären, werden weitere komplexe eisenhaltige Schrotte behandelt. Man unterscheidet dabei inputseitig die weiteren Produktgruppen „Weiße Ware“ (Haushaltsgroßgeräte wie z.B. Herde, Waschmaschinen und schadstoffentfrachtete Alt-Kühlgeräte) und „leichte Mischschrotte“ (Fahrräder, Fahrzeugteile, Badewannen, Leitungsrohre etc.). Diese beiden Gruppen sollen im Rahmen dieser Arbeit als NELV-Schrotte bezeichnet werden („Non-ELV-Schrotte“). Eine zunehmende Rolle spielen aber auch MVA-Schrotte, die ebenfalls als NELV-Schrotte dem Shredder vorlaufen. MVA-Schrotte stellen die auf Magnetscheidern abgetrennte grobe Fe-Fraktion des Ausbrands von Müllverbrennungsanlagen dar. Diese wurden bei der Zusammenstellung einer Standardmischung für die vorliegenden Untersuchungen ebenfalls berücksichtigt. Auf dem Gelände des BST wurden dazu definierte Kampagnen gefahren um Shredder-Rückstände aus diesen unterschiedlichen Inputmaterialien zu erzeugen. Neben der Fahrweise von 100 M-% ELV und 100 M-% NELV-Schrott zur Darstellung der Extrempunkte, wurde eine größere Kampagne mit einer ELV-NELV-Kombination gefahren, deren Zusammensetzung aus den mittleren Input-Zusammensetzungen vergangener Jahre (ohne Berücksichtigung temporärer Schwankungen durch z.B. die „Abwrackprämie“) aller bekannten Shredder-Anlagen gleichen Typs gemittelt wurde. Die Zusammensetzung wurde dabei zu 20 M-% ELV und 80 M-% NELV bestimmt. Zu beachten ist, dass durch die landesspezifische Vorgehensweise in Belgien in der Fraktion der NELV-Schrotte etwa 10 M-% weiße Ware in der entsprechenden Fraktion enthalten waren. Bezogen auf den gesamten Shredder-Input machte die weiße Ware folglich 8 M-% aus. Vollständig aufgeschlüsselt ergibt sich eine Zusammensetzung von 20 M-% ELV, 8 M-% weiße Ware und 72 M-% leichter Mischschrotte plus MVA-Schrotte. Dieses Mischungsverhältnis kann für die Untersuchungen als repräsentativ angesehen werden und wird im Weiteren als Standard-Mischung bezeichnet.

Die Zusammensetzung der Shredder-Chargen wurde dabei derart gesteuert, dass zwischen der Aufgabe von acht Altfahrzeugen (mittleres Gewicht ca. 1,2 t) etwa 20 Tonnen Mischschrott zur Behandlung zugeführt wurden. Dabei war zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuge entsprechend der gesetzlichen Regelungen von Schadstoffen entfrachtet waren und teilweise der Motor ausgebaut war. Das Fehlen der Motoren wurde dadurch aufgefangen, dass mittels

Aufgabegreifer eine zusätzliche Charge separater Fahrzeugteile zugeführt wurde (Getriebe, Motoren etc.). Scheiben und Scheinwerfer waren bei den ELV meist vorhanden.

Zwischen den einzelnen Shredder-Kampagnen wurde die Beschickung jeweils ausgesetzt, bis sich dies auch im Leichtgut-Bunker bemerkbar machte. Es wurde dann eine repräsentative Teilmenge mit einem Radlader abgenommen und separat gelagert. Der verbleibende Rest wurde verworfen. Der Bunker wurde geräumt und die Beschickung mit der nächsten Charge begonnen.

Die Shredder-Kampagnen in Belgien dauerten einen Tag, chronologisch stellten sie sich wie folgt dar:

- 11:00 Uhr: SLF-Bunker geleert, Shredder wurde bis dahin undefiniert beschickt
- 12:00 Uhr: Beginn der gezielten Aufgabe von definierten NELV-Schrotten
- 13:15 Uhr: Ende Aufgabe NELV-Schrott, Probenentnahme aus SLF-Bunker, leeren des SLF-Bunkers
- 13:25 Uhr: Beginn Aufgabe ELV
- 13:50 Uhr: Ende ELV Aufgabe, Probenentnahme aus SLF-Bunker, SLF-Bunker leeren
- 13:55 Uhr: Beginn Standard-Mischung: ELV und NELV-Schrotte werden nach dem bestimmten Verhältnis (s.o.) abwechselnd in den Shredder aufgegeben
- 14:30 Uhr: Ende Standard-Input-Mix, Durchmischung mittels Radlader, Probenentnahme

Als Aufgabematerial der VW-SiCon-Anlage wird ausschließlich SLF genutzt, da die SSF getrennt in anderen Anlagen (extern) verarbeitet wird. Die Proben wurden jeweils separat im Freien gelagert. Die in den Kampagnen erzeugten Shredder-Rückstände wurden in den darauffolgenden Wochen Vorort im Volkswagen-SiCon-Verfahren behandelt. Durch diese Behandlung wurde der im Folgenden zugrunde liegende Shredder-Sand < 5 mm erzeugt. Dieses Material wurde in Big Bags abgefüllt und an das IFAD der TU Clausthal überstellt.

Mittels Schüttkegel-Teilung wurden aus dem Material geeignete Proben generiert und zur Lagerung in Fässer abgefüllt. Für einen, den Untersuchungen vorgeschalteten, Siebschnitt wurde zunächst aus diesem Ausgangsmaterial chargenweise das Material neu vermischt und der Anteil mit Korngrößen < 1 mm abgesiebt. Die Einteilung in die Korngrößenklasse < 1 mm erfolgte derart, dass der Siebunterlauf bei einer Siebung mit einer Maschenweite von

1 mm bei einem planen Vibrationssieb erstellt wurde. Im Verlaufe der Untersuchungen wurde für die Siebung eine neuartige Vibrationssiebmaschine beschafft und eingesetzt. Dabei wurde entsprechend der Schräge des Siebbodens eine angepasste Siebmaschenweite (1,1 mm) eingesetzt (vgl. [32]).

Es wurden so Teilproben mit einer Masse von 50 kg hergestellt. Die weitere Verjüngung der Probenmenge erfolgte per Riffelprobenteiler. Der Einsatz eines Rotationsprobenteilers war aufgrund der Probenbeschaffenheit nicht möglich: flusige Anteile und längere Drahtstücke verstopften den Probenteilkopf der Anlage regelmäßig und hielten dadurch bestimmte Anteile der Probe zurück. Dieses Problem trat bei der Benutzung des Riffelprobenteilers nicht auf. Die vollständigen vorgeschalteten Arbeiten sind in Abbildung 4 dargestellt:

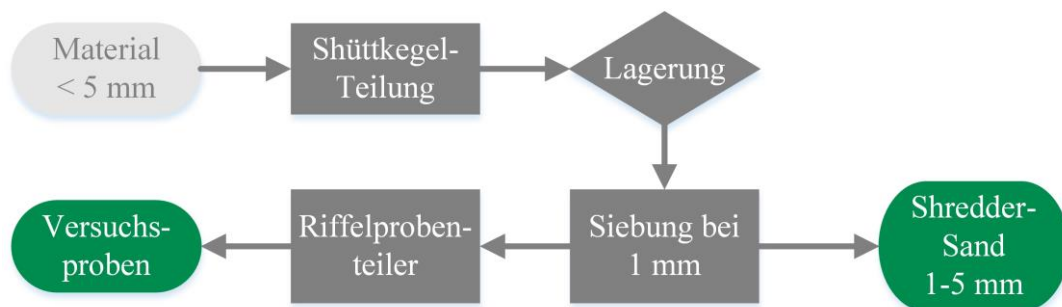


Abbildung 4: Vorbehandlung des Materials nach der Erzeugung durch das VW-SiCon-Verfahren

2.4 Angewandte Analysemethoden

Durch die Heterogenität des Materials und die Fülle der vorhandenen Elemente wurde basierend auf den Entwicklungszielen und unter Berücksichtigung der Voruntersuchungsergebnisse in [1] eine Auswahl an relevanten Elementen zur Analyse getroffen. Für erste Screenings beschränkte sich die Auswahl auf C, Cu, Fe, Pb, Si, Zn und den Glühverlust. Dabei wurde zunächst ein schrittweiser Aufschluss getrockneter Proben mit Königswasser durchgeführt. Dazu wird zunächst Salzsäure (HCl) vorgelegt und die eintretende Reaktion abgewartet. Wenn die ersten Reaktionen abklingen, wird dem System Wärme zugeführt. Wenn auch bei erhöhter Temperatur die Reaktionen kontrolliert ablaufen, wird eine entsprechende Menge Salpetersäure (HNO₃) zugegeben (Salzsäure : Salpetersäure → 3:1). Die in Königswasser unlöslichen Bestandteile wurden dann abfiltriert und in Flusssäure (HF) gelöst.

Die späteren Analysen auf eine größere Anzahl an Elementen konnte für die weiterführende Analytik dahingehend optimiert werden, dass für den Großteil der Elemente ein Königswasser-Aufschluss gewählt wurde. Zuvor wurde von den Proben der Glühverlust

bestimmt. Dies wurde mittels Glühprobe ermittelt, wobei die Probe in einem Muffelofen bei 550 °C für etwa 2 Stunden geglüht wurde (vgl. DIN 18128). Die Gewichts Differenz vor und nach der Erhitzung ergibt den Glühverlust und ist ein Indiz für organische Bestandteile. Ein negativer Glühverlust (Gewichtszunahme) bei Proben mit hohem Metallanteil deutet dabei allerdings auf die Oxidation der Metalle hin und wurde entsprechend beachtet.

Für Kohlenstoff- und Schwefelmessungen kam ein Gasanalysator im Sauerstoffstrom mit Infrarot-Messzelle der Fa. Leco zum Einsatz (Leco CNS 2000), der die Elemente als CO₂ und SO₂ aus der ungeglühten Probe misst. Ebenfalls aus der ungeglühten Probe wurden Fluorid, Chlorid und Bromid mittels NaOH-Schmelze und anschließender Ionenchromatographie gemessen. Die weiteren (halb-) metallischen Bestandteile wurden nach dem Aufschluss mittels optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) bestimmt. Dabei kam ein axial messendes Gerät der Fa. Varian zum Einsatz (Vista MPX), dass durch eine automatische Probenzufuhr versorgt wird.

Die Elemente Al, Mg, Na und Si wurden dabei zuvor mit Lithiumtetraborat unter Druck aufgeschlossen (Li₂B₄O₇ im Mikrowellenaufschluss) und einer matrixangepassten Messung unterzogen. Für den Antimon- und Zinn-Nachweis wurde ebenfalls unter Druck, allerdings mit Königswasser, aufgeschlossen. Für alle weiteren untersuchten Elemente wurde ein einfacher Königswasser-Aufschluss unter Atmosphärendruck durchgeführt.

2.5 Materialcharakterisierung

Shredder-Sand ist ein braun-graues Material, im Erscheinungsbild einer handelsüblichen Blumenerde ähnlich, allerdings mit deutlich sichtbaren Anteilen an Drähten, Flusen und Splitter-ähnlichen Partikeln. Die Hauptmenge des Sands stellt sich unter dem Mikroskop als inhomogenes Gemisch von Eisen- und NE-Partikeln, sowie aus Glas und anderen mineralischen Bestandteilen, Lackpartikel, restlichen Kunststoffen und organischen Bestandteilen wie Textilmaterial und holzartigen Partikeln (siehe Abbildung 5) dar.

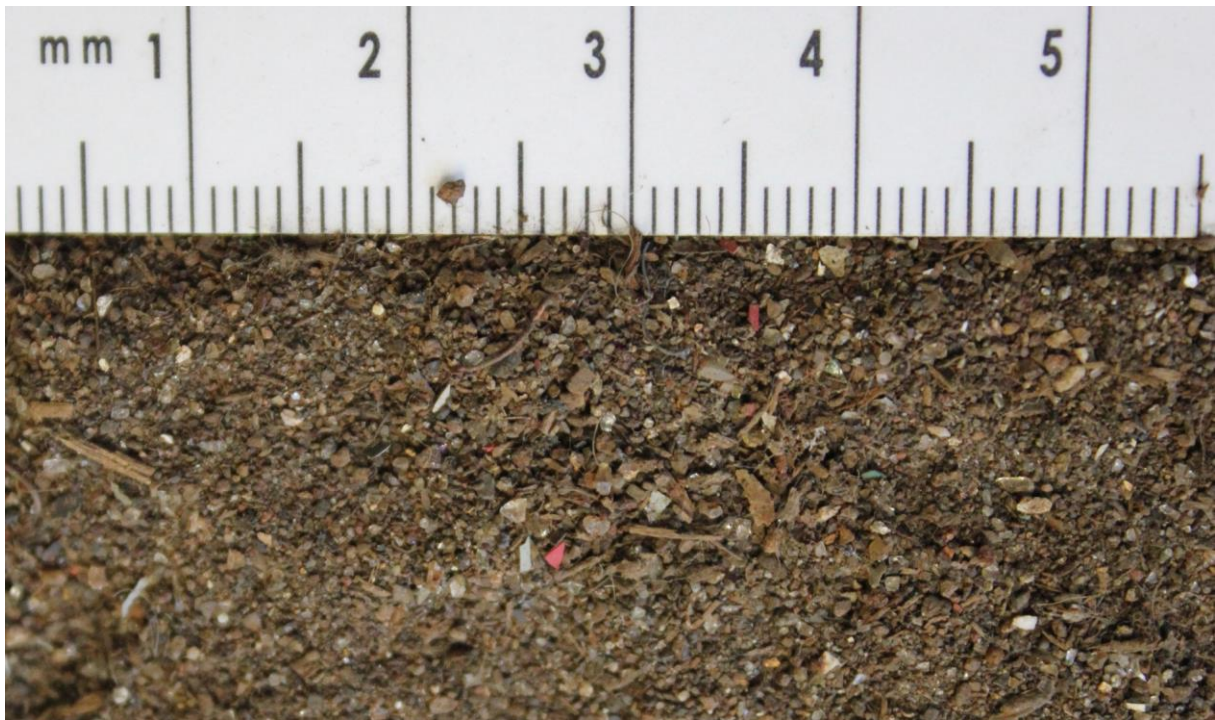


Abbildung 5: Shredder-Sand-Proben aus den Untersuchungen - verwendetes Versuchsmaterial mit Korngrößen $< 1\text{ mm}$

Über die Messung der Partikelanzahl und die Auswertung der Partikelgrößenbestimmung mittels Laserbeugung (Helos BR, Fa. Sympatec) wurde eine Korngrößenverteilung erstellt. Die Auswertung der Daten ergibt die in Abbildung 6 dargestellten Korngrößenverteilungen sowohl als Korngrößenverteilungssumme Q_0 als auch als Korngrößenverteilungsdichte q_0 , bezogen auf die mittlere Korngröße $x_{b,m}$ entsprechender Korngrößenklassen.

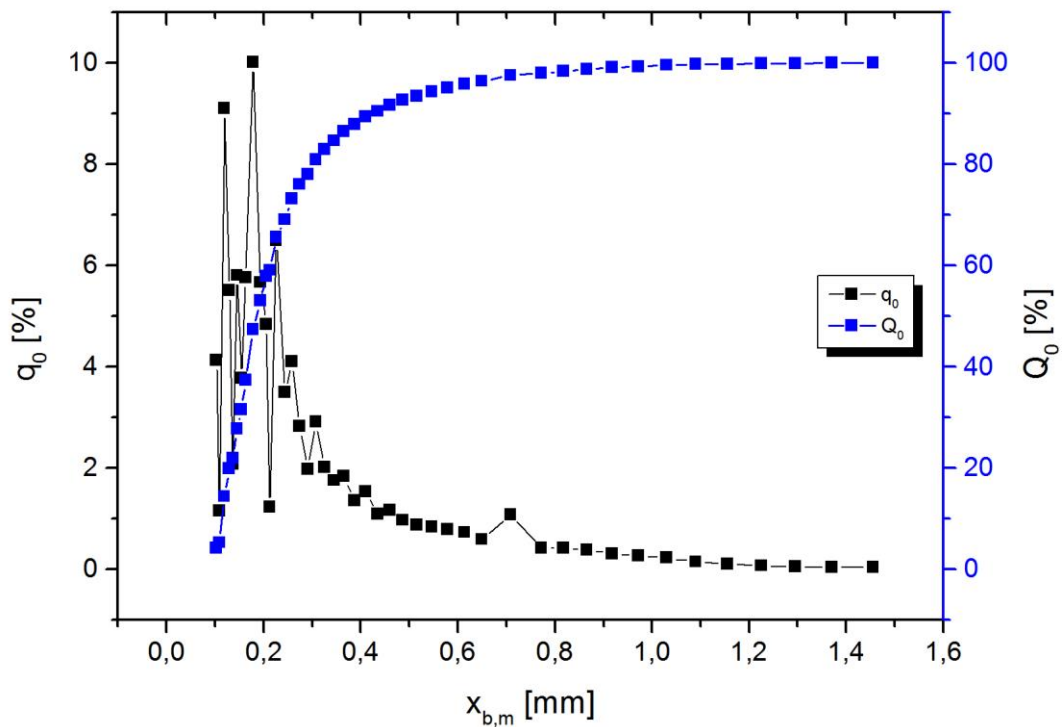


Abbildung 6: Korngrößenverteilungssumme Q_0 und Korngrößenverteilungsdichte q_0 bezogen auf die mittlere Korngröße der jeweiligen Kornklasse $x_{b,m}$

Es ist dabei zu beachten, dass auch bezüglich der Korngröße eine starke Inhomogenität des Materials besteht. Darüber hinaus mussten händisch bei jeder Messprobe unterschiedliche Mengen an grobem Flusenmaterial im Vorfeld entfernt werden, damit die Messgeräte nicht verstopften, so dass die flusigen Materialien bei der Korngrößenbestimmung keinen Anteil hatten.

Weiterführende Versuche das Material hinsichtlich seiner Kornform genauer zu charakterisieren (z.B. Kubizität, Oberflächenrauigkeit etc.) sind nicht möglich, da es zu unterschiedliche Kornformen beinhaltet. Neben Litzenkupfer (lang und dünn) kommen Glassplitter (kompakte, eher kubische Partikel), Lackpartikel (flächige Partikel), Holzpartikel (faserig-stängelige Partikel) und andere Formen vor. Abbildung 7 zeigt eine Detail-Aufnahme von Shredder-Sand und darin enthaltene Partikelformen.



Abbildung 7: Darstellung einzelner Kornformen aus Shredder-Sanden (Stereomikroskop, trocken, 8fach)

Für die so erzeugten Proben wurden darüber hinaus chemische Untersuchungen vorgenommen und mit den entsprechenden Ergebnissen der Vorarbeiten verglichen. Es wurde dabei festgestellt, dass sich große Schwankungsbreiten ergeben; so schwankt z.B. der Eisen-Gehalt zwischen 18 und 22 M-% und der Silizium-Gehalt zwischen 13 und 16 M-%. Es wurden daher für die einzelnen Proben Mittelwerte aus dem vorhandenen Probenmaterial bestimmt, wie sie in Tabelle 3 aufgeführt sind. Es fällt bereits an dieser Stelle der Unterschied in der Zusammensetzung der Proben < 5 mm (s. Tabelle 2) und der Proben < 1 mm auf (s. Tabelle 3).

Da die Herstellung der „Standard-Mischung“ aus einer eigenen Kampagne mit separatem Aufgabenmaterial erfolgte, muss festgestellt werden, dass die Shredder-Sande aus der Standard- Mischung nicht dem rechnerischen Wert der Mischungen aus 20 M-% ELV und 80 M-% NELV allerdings ohne MVA-Schrott-Anteile entspricht. Vielmehr muss festgestellt werden, dass es bei der Herstellung der Standard-Mischungsprobe zu Gehaltsschwankungen im Vergleich zu den ELV- bzw. NELV-Proben gekommen ist. Die erhöhten Eisen und Kohlenstoffwerte sowie die geringeren Silizium-Werte zeigen dies. Darüber hinaus wird deutlich, wie stark die Materialzusammensetzung der Shredder-Sande aus unterschiedlichen

Chargen durch Unterschiede in der Shredder-Aufgabe schwanken können und verdeutlicht die bereits anderweitig aufgezeigten Schwierigkeiten bei der Abtrennung kleiner Probemengen aus SLF oder daraus bereits zuvor abgetrennter Teilproben (s. dazu auch [17] und [33]).

Tabelle 3: Vergleich der chemischen Analysen durchschnittlicher Proben aus den eigenen Untersuchungen und einer durchschnittlichen Probe aus den Untersuchungen [1]

Element	Standard-Mischung	100 M-% ELV	100 M-% NELV	Proben im Mittel nach [1]
Kohlenstoff	11,3 M-%	9,2 M-%	9,9 M-%	11,47 M-%
Eisen	21,5 M-%	19,6 M-%	18,2 M-%	11,9 M-%
Silizium	12,7 M-%	16,0 M-%	15,0 M-%	15,3 M-%
Zink	1,1 M-%	1,2 M-%	1,8 M-%	2,6 M-%
Kupfer	0,6 M-%	0,7 M-%	0,6 M-%	1,0 M-%
Blei	0,2 M-%	0,3 M-%	0,4 M-%	0,9 M-%
Sonstige Bestandteile	52,6 M-%	53,0 M-%	54,1 M-%	56,83 M-%

Trotz der Abweichung der Standard-Mischungsprobe von den Sensitivitätsmessungen an den Proben aus 100 M-% ELV und 100 M-% NELV ohne MVA-Schrotte wurden die Hauptuntersuchungen an der Standard-Mischung durchgeführt. Der Einsatz von MVA-Schrotten in Shredder-Prozessen ist nicht immer oder überall gegeben, sollte aber grundsätzlich mit berücksichtigt werden. Es ist davon auszugehen, dass die leicht veränderte Zusammensetzung durch die Veränderung in der Aufgabe keinen Einfluss auf das Trennverhalten der Shredder-Sande haben wird.

Darüber hinaus wurde die Restfeuchte bestimmt, indem Proben bei 105 °C bis zur Massekonstanz im Trockenschrank verblieben (vgl. DIN ISO 11465). Die Werte variieren zwischen ca. 3 M-% (Messung bei der SICON an trockenem Material) und 18 M-% (eigene Messungen der feuchten Proben aus der Shredder-Kampagne bei Regenwetter).

Es wurde im weiteren Verlauf darauf verzichtet, bei jeder Probe einen Restwassergehalt zu bestimmen, da für den präferierten nassen Verfahrensweg eine Trocknung nicht notwendig war und der Restfeuchtegehalt so keine entscheidende Rolle in der Verfahrensentwicklung spielt.

Es ist darüber hinaus aus Tabelle 3 ersichtlich, welche grundsätzlichen Unterschiede, gerade hinsichtlich der Eisen-Gehalte, zwischen dem in diesem Projekt untersuchten Material und dem in [1] untersuchtem Material auftreten.

Die anteilige Zusammensetzung der im Shredder-Sand enthaltenen Wert- und Reststoffe ist nicht nur von den zum Einsatz kommenden vorlaufenden Verfahrensschritten zur Aufbereitung abhängig. Gerade die Inputmaterialien tragen in unterschiedlichem Maße zur Zusammensetzung der Shredder-Sande bei: je nach Anteil der sandbildenden Stoffgruppe (ELV, weiße Ware, Mischschrott), verändert sich die Zusammensetzung der Shredder-Sande. So ist zu vermuten, dass ELV auf der einen Seite höhere Anteile an Glas, Sand und textilen Material in die Shredderleichtfraktion eintragen, weiße Ware auf der anderen Seite (durch die Sockelgewichte von Waschmaschinen und Schleudern) den Anteil an Beton erhöhen. Mischschrott hingegen wird wenig zur Sand-Fraktion beitragen, bestenfalls den Anteil an Lackpartikel und durch Spröddbruch vermehrt entstehende Metallpartikel, MVA-Schrotte dürften durch abplatzende Schichten oberflächlich oxidierte Eisenteile den Anteil an Eisen bzw. Eisenoxiden erhöhen.

Darüber hinaus bilden die einzelnen Stoffgruppen (ELV, weiße Ware, Mischschrott) in unterschiedlichen Anteilen die Shredderrückstände und damit auch den Shredder-Sand. In Tabelle 4 sind die unterschiedlichen Verhältnismäßigkeiten für eine Shredder-Input-Mischung aus einer frühen Versuchsreihe nach [9] aufgeführt und dienen der Plausibilisierung des geschilderten Phänomens

Tabelle 4: Zusammensetzung der Shredderrückstände und Anteile im VW-SiCon-Verfahren nach [9]

Input Typ	Anteil an Shredder- rückstand bezogen auf Input	Anteil Input, der als Shredder-Sand ausgetragen wird (Output VW-Sicon- Verfahren) bezogen auf 100 M-% Shredderrückstand
Baustähle und leichter Mischschrott	15 M-%	59 M-%
Weißer Ware	35 M-%	36 M-%
Altfahrzeuge (ELV)	50 M-%	19 M-%
Gesamt	100 M-%	31 M-%

Die Tabelle ist so zu lesen, dass z.B. bei einem Input aus ELV, etwa 50 M-% der Shredder-Rückstandsmasse als Anteil eben dieser Altfahrzeuge identifiziert werden können. Es wird auch aufgeführt, dass der Anteil des Shredder-Sandes aus einer ELV-Fraktion 19 M-% des Inputs beträgt. Dies zeigt, dass sich die relativen Mengenverhältnisse an Granulat-, Flusen- und Sandanteilen in den spezifischen Shredder-Rückständen je nach Input erheblich unterscheiden.

Durch die in Tabelle 4 gewählte beispielhafte Input-Zusammensetzung von 35 M-% ELV und den entsprechend angegebenen Anteilen anderer Stoffe werden in Summe ca. 31 M-% der Shredder-Rückstände als Shredder-Sand aus dem VW-SiCon-Verfahren ausgeschleust.

3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch die Anregung des BMBF zur Vernetzung von unterschiedlichen Projekten des r²-Verbundes wurde eine gemeinsame Untersuchung mit der Bauhaus Universität Weimar (BU Weimar) initiiert. Es wurden durch die Mitarbeiter vor Ort umfassende Untersuchungen zur Nutzung von aufbereitetem Shredder-Sand für die Erzeugung sogenannter Aufbaukörnung und zur Blähfähigkeit des mineralischen Materials durchgeführt (siehe Kapitel 5.5.3) und die Ergebnisse mit den ansonsten üblichen Betriebsparametern beim Einsatz von Blähtonen verglichen (vollständiger Bericht im Anhang). Da das geblähte Material als Baustoff eingesetzt werden könnte, wurde auch eine Materialprüfung unter dem Gesichtspunkt chemischer Kriterien der Zulassung als Recycling-Baustoff durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung vorgenommen (Prüfprotokolle im Anhang).

Um die Einsatztauglichkeit noch nicht industriell eingesetzter Trenntechniken zur Aufbereitung der Shredder-Sande zu validieren wurden auch externe Versuche mit neuartigen Geräten und Verfahren bei entsprechenden Unternehmen und Forschungseinrichtungen durchgeführt. Zum einen wurde für die Abtrennung feiner Metallpartikel der Einsatz eines Barrieren-Wirbelstrom-Scheiders der Firma Exner (siehe Kapitel 5.1.4) vor Ort getestet, zum anderen wurde das neuentwickelte Verfahren zur Kornformsortierung der TU Bergakademie Freiberg auf die Einsetzbarkeit für die Abtrennung feiner und feinsten Litzendrähte geprüft (siehe Kapitel 5.1.4).

Durch das Institut für Energieverfahrenstechnik und Brennstofftechnik der technischen Universität Clausthal wurden zudem die Untersuchungen der Heizwerte und Brennwerte (siehe Kapitel 5.1.2) durchgeführt (Prüfprotokolle im Anhang).

Schließlich wurden auch Versuche zur Auswahl und Dimensionierung einer industriell einsetzbaren pneumatischen Flotationsanlage durch die MBE Coal & Minerals Technology GmbH durchgeführt (siehe Kapitel 5.1.2).

Die ökonomische Betrachtung (siehe Kapitel 6.3) wurde federführend durch den Projektpartner SICON GmbH durchgeführt und die ökologische Bewertung (siehe Kapitel 6.4) wurde durch den Projektpartner VW AG an das Öko-Institut Darmstadt vergeben. Die Bestimmung strategisch günstiger Standorte einer Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage wurde als Studienarbeit an der Ostfalia Hochschule Wolfsburg unter Betreuung von VW angefertigt und für diese Arbeit zur Verfügung gestellt (siehe Kapitel 6.3.3).

4 Aufgabenstellung und Arbeitsplanung des vorliegenden Projektes

Shredder-Sande < 5 mm bilden einen wesentlichen Teilstrom aus der Shredder-Rückstands-Aufbereitung. Dieser Teilstrom, für den es zum Zeitpunkt der Antragsstellung des zugrunde liegenden Projekts keine ressourceneffiziente Verwertungsmöglichkeit gab, besteht hauptsächlich aus mineralischen Komponenten (Quarz, Silikate, Karbonate u.a.), enthält jedoch neben Organikanteilen und Eisen auch Buntmetalle in feinen und feinsten Körnungen. Es wurde davon ausgegangen, dass zukünftig nicht nur die anfallende Menge an Shredder-Sanden zunimmt, sondern auch die Gehalte an Kupfer und Zink durch technische und technologische Weiterentwicklungen steigen werden. Die Ursache wird sowohl im Bereich der Veränderungen der vorgeschalteten Aufbereitungsstufen z.B. durch Einsatz größerer Shredder-Aggregate, die auch massivere und somit stärker verzinkte Schrotte verarbeiten können (Zink), als auch in den Input-Stoffen, z.B. durch einen steigenden Anteil von Elektronikkomponenten in Fahrzeugen und Haushaltsgeräten (Kupfer), gesehen (vgl. [2]).

Ziel des Vorhabens war es daher, ein Aufbereitungsverfahren für Shredder-Sande zu entwickeln, mit dem die Buntmetallinhalte weitest möglich zurückgewonnen werden können. Des Weiteren sollten dabei die Mineralstoffe, die die Hauptmasse der Matrix bilden, soweit von organischen und metallischen Bestandteilen entfrachtet werden, dass sie als Zuschlag für die Erzeugung von Recyclingbaustoffen o.ä. Verwendung finden können.

In Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass in mehreren Verfahrensschritten im Labormaßstab eine Auftrennung von Shredder-Sanden in ein Eisen-Konzentrat, ein Kupfer-Konzentrat, ein zink- und bleidominiertes Metall-Mischkonzentrat, eine Mineralstoff-Fraktion und eine organikreiche Restfraktion möglich ist. Andere, im Ausgangsstoff vorhandene Metalle, wie z.B. Aluminium wurden für die Aufbereitungsversuche in diesem Forschungsprojekt nicht explizit berücksichtigt. Auf Grund des Vorliegens als Metall, aber in nennenswerten Anteilen auch in Oxiden bzw. Silikaten war absehbar, dass es unter wirtschaftlich und ökologisch sinnvollen Bedingungen nicht möglich sein würde, diese Materialien in einer eigenen verwertbaren Konzentrat-Fraktion zurückzugewinnen.

Grundsätzlich können bei Shredder-Sand die Fraktionen > 1 mm und < 1 mm unterschieden werden. Während für Fraktionen > 1 mm übertragbare Verfahrensansätze existieren, etwa aus der Aufbereitung des Kornbandes 1–10 mm aus der Shredderschwerfraktion, wie sie bei der GfM GmbH in Ennepetal praktiziert wird (Mineralische Anteile > 5 mm lassen sich z.B. aus Shredder-Rückständen relativ einfach als saubere Mineralik-Fraktion ausschleusen, spielen

aber mengenmäßig nur eine untergeordnete Rolle), fehlt für die Fraktion < 1 mm bisher ein industriell umsetzbares Verfahren. Daher sollte aufbauend auf den o.g. Voruntersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes ein komplettes Verfahren speziell für die Fraktion < 1 mm entwickelt werden. Ziel war es, rund 80 % der Masse und den größten Teil der Metalle Eisen, Kupfer, Zink und Blei einer Verwertung zuzuführen. Abschließend war die industrielle Umsetzbarkeit unter technischen, ökonomischen und ökologischen Aspekten zu bewerten. Eine Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Shredder-Sand-Fraktion > 1 mm sollte überprüft werden, um evtl. eine Verfahrenserweiterung für diese Teilfraktion zu erreichen.

Anhand der in dem zugrunde liegenden Projekt aufgestellten Arbeitspakete soll das Vorgehen bei der Entwicklung eines Separationsverfahrens für Shredder-Sande kurz dargestellt werden. Die eigentlichen Untersuchungen wurden weitestgehend anhand dieses Grundplans erarbeitet.

4.1 Arbeitspaket 1: Entwicklung des Separationsverfahrens

- 1.1. Optimierung und Erweiterung des in den Voruntersuchungen ermittelten Verfahrensansatzes zur Aufbereitung von Shredder-Sand aus dem Volkswagen-SiCon-Verfahren für eine Standardmischung des Shredder-Inputs (Altfahrzeuge, weiße Ware, leichter Mischschrott mit Anteilen von MVA-Schrotten), Fraktion < 1 mm (Hauptprozesse)
- 1.2. Anwendung des Verfahrensansatzes auf Shredder-Sand-Proben unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung, Überprüfung von Prozess-Stabilität und –Flexibilität einschließlich weiterführender mineralogischer Analytik
- 1.3. Erweiterung der Untersuchungen auf Shredder-Sand-Fractionen > 1 mm bzw. die verbleibenden Restfraktionen einer trockenmechanischen Separation dieses Stoffstroms nach dem aktuellsten Stand der Technik
- 1.4. Untersuchungen zu den erforderlichen Peripherie-Prozessen wie Fällung, Flockung, Entwässerung, Laugenführung
- 1.5. Erzeugung von ausreichend großen Mengen an Aufbereitungsprodukten für erste Einsatzuntersuchungen bei Abnehmern der Aufbereitungsprodukte
- 1.6. Erweiterung/Anpassungen des Verfahrens an die konkreten Anforderungen der Abnehmer
- 1.7. Ermittlung prozesstechnischer Parameter zu Materialflüssen und umlaufenden Lasten sowie zu Verbrauch an Wasser, Strom und sonstigen Betriebsmedien,

Abwasseranfall u.a. wirtschaftlich und ökologisch wichtigen betrieblichen Parametern

4.2 Arbeitspaket 2: Verwertungstests an Aufbereitungsprodukten

- 2.1. Untersuchungen zur Verwertung des Kupferlizen-Konzentrats
- 2.2. Untersuchungen zur Verwertung des Eisen-Konzentrats
- 2.3. Untersuchungen zur Verwertung der Mineralstoff-Fraktion
- 2.4. Untersuchungen zur Verwertung der zink- und bleireichen gefällten NE-Metall- Fällungsschlämme
- 2.5. Ermittlung geeigneter Verwertungs-/Beseitigungswege für die Restorganik-Fraktion

4.3 Arbeitspaket 3: Anlagenkonzeptionierung bis basic design

- 3.1. Anlagenkonzeptionierung
- 3.2. Klärung relevanter Fragen zum abfallrechtlichen Genehmigungsverfahren
- 3.3. Process design
- 3.4. Basic design

4.4 Arbeitspaket 4: ökonomische Bewertung

- 4.1. Ermittlung potentieller In- und Outputwege und Logistikkosten
- 4.2. Ermittlung Kosten und Erlöse für In- und Output sowie Abschätzung der Marktentwicklung
- 4.3. Investitions- und Betriebskosten-Abschätzung
- 4.3. Sensitivitätsanalyse
- 4.4. Erstellung eines Businessplans

4.5 Arbeitspaket 5: Bewertung von Materialeffizienz und ökologischer Wirkung

- 5.1. Ermittlung der prozentualen Anteile von Inhaltsstoffen und erzeugbaren Produkten in Abhängigkeit der unterschiedlichen Inputströme (Abfallströme): Auswirkungen auf die Stoffstrombilanz der Gesamtprozesskette der Altprodukte-Verwertung
- 5.2. Bewertung des Rohstoffeinsatzes entlang der gesamten Prozesskette
- 5.3. Ökologische Bewertung des Verfahrensansatzes mit Hilfe einer vergleichenden Ökobilanz gegenüber dem bisherigen Stand der Technik

4.6 Arbeitspaket 6: Projektabschluss und Transfer

- 6.1. Zusammenfassung aller Projektergebnisse bezüglich technischer, logistischer und anderer Erfahrungen: Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen
- 6.2. Qualifizierte Einschätzungen bzgl. der industriellen Umsetzbarkeit der Ergebnisse (neue technische Standards)
- 6.3. Quantifizierung der möglichen Beiträge zur Rohstoffe- und Energieproduktivität im Lichte der gesamten Projekterfahrungen und –ergebnisse
- 6.4. Darstellung von Transferoptionen

Die Promotionsarbeit basiert auf der eigenständigen Bearbeitung und Entwicklung verschiedener Teilschritte im beschriebenen Gesamtprojekt und umfasst im Wesentlichen die eigentliche Verfahrensentwicklung sowie die Bewertung und Zusammenführung aller Ergebnisse. Die im Rahmen der vorliegenden Promotionsarbeit bearbeiteten Arbeitspakete sind vor allem die Arbeitspakete 1 und 2 sowie 5.1, 5.2 und 6. Das Arbeitspaket 2 wurde sowohl im Rahmen der vorliegenden Arbeit als auch ergänzend durch Mitarbeiter der SiCon bearbeitet. Die Arbeitspakete 3 und 4 wurden durch Mitarbeiter der SiCon auf Grundlage und in Abstimmung mit den im Rahmen der Promotion ermittelten Ergebnissen erarbeitet. Das Arbeitspaket 5.3 wurde durch das Ökoinstitut ebenfalls auf Grundlage der zuvor im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Daten erstellt.

5 Entwicklung eines Separationsverfahrens für die Auftrennung von organischen Bestandteilen, Metallen und mineralischen Bestandteilen

5.1 Verfahrensentwicklung

Die Untersuchungen zur Verfahrensentwicklung wurden, wie bereits erwähnt, an Shredder-Sanden mit einer Zusammensetzung der Inputstoffe aus dem zuvor geschilderten Standard-Mix für Shredder-Input durchgeführt. Durch die Inhomogenität der Input-Materialien muss bei der gesamten Verfahrensentwicklung darauf geachtet werden, dass das Verfahren gegenüber Schwankungen im Inputmaterial möglichst unempfindlich ist. Sensitivitätsanalysen der Fraktionen aus 100 M-% ELV und 100 M-% Mischschrotten sind in Kapitel 5.2 dargestellt.

Da ein erheblicher Teil der geplanten Verfahrensführung auf der Abtrennung gewünschter Teilfraktionen basiert, wurden zunächst einige Grundüberlegungen zur Verfahrensführung angestellt. Durch das breite Korngrößenband der Shredder-Sande musste festgestellt werden, dass eine durchgängig trockene Aufbereitung nicht durchführbar ist. Nach der gängigen Literatur können so z.B. Verfahren der Hydrosortierung bei Trennkorngrößen < 1 mm angewendet werden, eine Aerosortierung sollte bei Trennkorngrößen $> 0,1$ mm eingesetzt werden [34]. Zur Abtrennung feiner und feinsten Partikel muss zur Überwindung der Haftkräfte als Trennmedium Wasser eingesetzt werden, während gerade für die Schritte einer frühzeitigen Abtrennung gröberer Partikel die Möglichkeit der trockenen Verfahrensführung besteht.

5.1.1 Benetzung

Zunächst wurde zur bestmöglichen Benetzung der Shredder-Sande eine Dispergierung des Shredder-Sandes in Wasser untersucht. Die besten Ergebnisse unter Abwägung von Aufwand und Benetzungsgrad wurden bei einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:3 ohne Zuhilfenahme von Dispergierhilfsmitteln in einem hexagonalen Rührgefäß und zehnminütiger Agitation erreicht.

In [1] wurde eine Attritionierung für 3 bis 5 Minuten bei einem Feststoff- zu Wasserverhältnis von 1:2 in einem zylindrischen Rührgefäß mittels Rührer vorgeschlagen. Die in einer solchen Versuchsanordnung auftretenden turbulenten Bereiche der Suspension, die in diesem Falle die notwendigen Durchmischungszonen der Medien zur Attritionierung und

Agglomeratauflösung bilden, sind ausschließlich im Bereich des Rührwerks zu finden. Für die notwendige Durchmischung der gesamten Suspension der in dieser Arbeit untersuchten Shredder-Sande nur durch die turbulenten Zonen am Rührwerk ergaben sich in den Vorversuchen allerdings deutlich längere Rührzeiten. Um die Rührzeiten zu verkürzen musste also entweder eine Lösung gefunden werden, die mehr Turbulenz im System erzeugt oder ein Dispergierhilfsmittel eingesetzt werden.

Auf den Einsatz von Dispergierhilfsmittel sollte verzichtet werden, da, je nach Wirkprinzip Änderungen an den Partikeloberflächen verursacht werden, die sich im weiteren Verlauf der Aufbereitung des Materials negativ auswirken können, insbesondere auf nachfolgende Flotationsstufen. Stattdessen wurde die Turbulenz im System um ein Maß erhöht, das möglichst gute Durchmischung bei gleichzeitig niedrigem Lufteintrag ermöglicht. Dazu wurden unterschiedliche Versuche zu Rührgefäßgeometrien und Rührwerkskonfigurationen untersucht. Durch den abrasiven Charakter des Shredder-Sandes wurde in Untersuchungen zum Einsatz von Strömungsbrechern allerdings deutlich, dass in dieser Konfiguration der Verschleiß an den Strömungsbrechern überdurchschnittlich hoch sein würde. Daher wurde ein hexagonales Rührgefäß entworfen, dimensioniert und angefertigt, bei dem die Ecken turbulente Bereiche ausbilden und so die Funktion der Strömungsbrecher übernehmen, ohne zu große Totzonen wie in rechteckigen Geometrien zu bilden.

Da die Verfahrensführung im nassen Milieu die Förderung zwischen den Trennaggregaten mittels Pumpen nahelegt, musste in diesem Schritt auch dieser Aspekt berücksichtigt werden. Um die verlässliche Förderfähigkeit in hydraulischen Systemen zu erreichen, musste der Feststoffgehalt im Vergleich zu den Vorversuchen gesenkt werden. Das in den Versuchen bestimmte ideale Verhältnis von Feststoff zu Wasser beträgt 1:3.

Durch Rührversuche wurde schließlich auch die optimale Rührzeit dadurch bestimmt, dass kontinuierlich während des Dispergierprozesses Proben gezogen wurden, die optisch und haptisch auf trockene Agglomerate hin untersucht wurden. Das Ausbleiben dieser nach zehn Minuten Rührzeit wurde mehrfach bestätigt und wurde so als Rührzeit-Optimum bestimmt.

5.1.2 Abtrennung der Organik

Nach der erfolgreichen Dispergierung konnte das Material in weiteren nassen Trennstufen auf sein Trennverhalten hin untersucht werden.

In den ersten Versuchen, in denen die Übertragbarkeit der Ergebnisse des in den Vorversuchen genutzten Forschungsnassherds auf einen Nassherd der industriell hochscalierbar ist, (eingehende Beschreibung siehe Kapitel 5.1.2.2) untersucht wurde, musste festgestellt werden, dass sich durch die unterschiedlichen Herdoberflächen trotz adäquater Adaption der Parameter Neigung und Querwasserstrom unvorhergesehene Effekte einstellten. So konnte der Anteil aus feinkörnigen Lacken, Holzpartikeln und dergleichen weiterhin abgetrennt werden. Aus den textilen Anteilen bildeten sich allerdings durch die gesteigerte Reibung der Tischoberfläche und der andersartigen Anordnung der verbauten Stege (Erhöhungen auf der Tischoberfläche) des größeren hochscalierbaren Nassherds verfaserte Klumpen oder Flusen, die durch ihre Größe im Verhältnis zur Höhe der Querwasserfilmströmung ein festes Hindernis darstellten. Es konnte beobachtet werden, dass einige Flusen ausreichend waren, um die Herdfläche zu blockieren und so das Sortierergebnis des Herdes stark zu verfälschen. Es wurde aufgrund der Beobachtungen entschieden, dass es notwendig sei, zunächst eine zusätzliche vorgeschaltete Separationseinheit für den textilen Anteil zu entwickeln und zu implementieren.

5.1.2.1 Vorabtrennung einer Flusenfraktion

Es wurden zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahrenswege identifiziert: Durch die Beschaffenheit der abzutrennenden Textilflusen und deren Größe wurden eine trockene und eine nasse Vorabtrennung untersucht. Bei der nassen Verfahrensführung konnten dabei Synergieeffekte mit der Attritionierung erzielt und genutzt werden.

Der trockene Verfahrensweg aus Prallmühle, Sieb und Sieb wurde aus Erkenntnissen entwickelt, die in einem vorlaufenden, bereits abgeschlossenen Projekt zur Aufreinigung der Textilfraktion aus den textilen Rückständen des Reifenrecyclings gewonnen wurden [35]. In der für den Shredder-Sand adaptierten Verfahrensvariante erfolgt zunächst eine Auflockerung der textilen Anteile des Shredder-Sands mittels Prallmühle. Durch die Prallbeanspruchung werden textile Anteile weiter aufgefasert und bilden so ein größeres Volumen. Darüber hinaus werden nicht textile Partikel wie Litzen und andere Metalle sowie mineralische Bestandteile aus den Flusen herausgelöst. Dies kann in einer anschließenden Umlenksichtung für die Trennung von Schwergut (Metalle und Sand) und Leichtgut (textile Anteile) ausgenutzt werden. Für die Sichterversuche wurde ein Umlenksichter eigener Bauart eingesetzt (s. Abbildung 8).

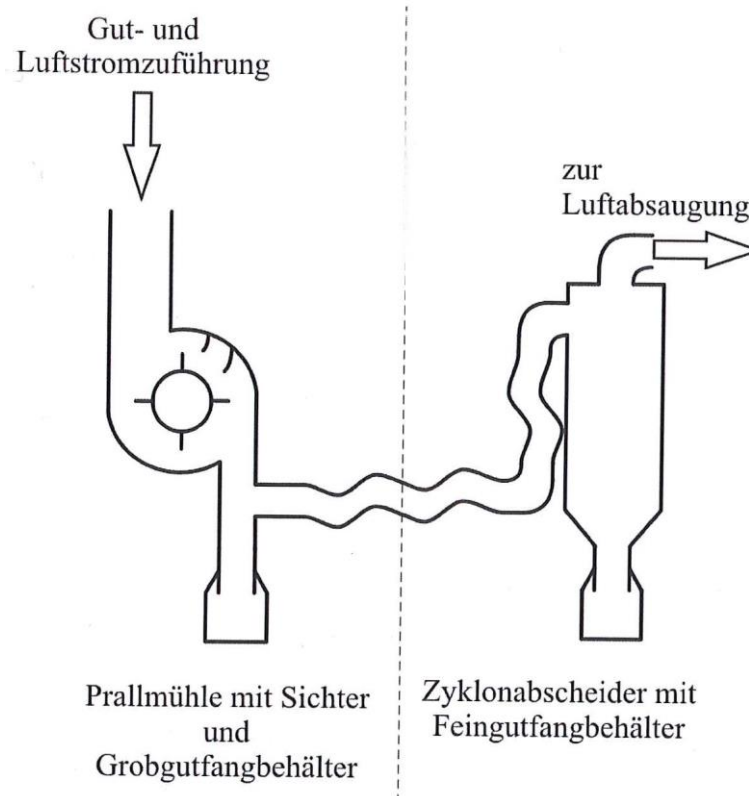


Abbildung 8: Skizze der Umlenksichtung und Trennung der Schwer- und Leichtgutfraktion aus der Förderluft (nach [35])

Durch die abrupte Richtungsänderung des Förderluftstroms werden die leichten Materialien mitgerissen, wohingegen die schwereren und damit trägeren Materialien nicht abgelenkt werden können und so in den entsprechenden Auffangbehälter fallen. Schwere und/oder kompakte Partikel werden durch die Trägheit nur in einem geringen Maße oder gar nicht umgelenkt und fallen als Schwergut an. Die leichten und voluminösen Textilpartikel folgen dem umgelenkten Luftstrom und werden mittels Aerozyklon vom Transportmedium abgetrennt. Die textile Fraktion wird im Anschluss mittels Siebung von noch vorhandenen fehlausgetragenen Sand-Bestandteilen separiert. Durch die Volumenvergrößerung und der Neigung zur Verfilzung ist dieses Material kaum siebgängig bei kreisschwingenden Siebböden mit Maschenweiten von 0,5 mm bis 1 mm. Das Schwergut der Sichtstufe und der Siebunterlauf können im Anschluss wieder vereinigt werden. Das Verfahrensfliessbild für die trockene Abtrennung der textilen Anteile ist in Abbildung 9 dargestellt.

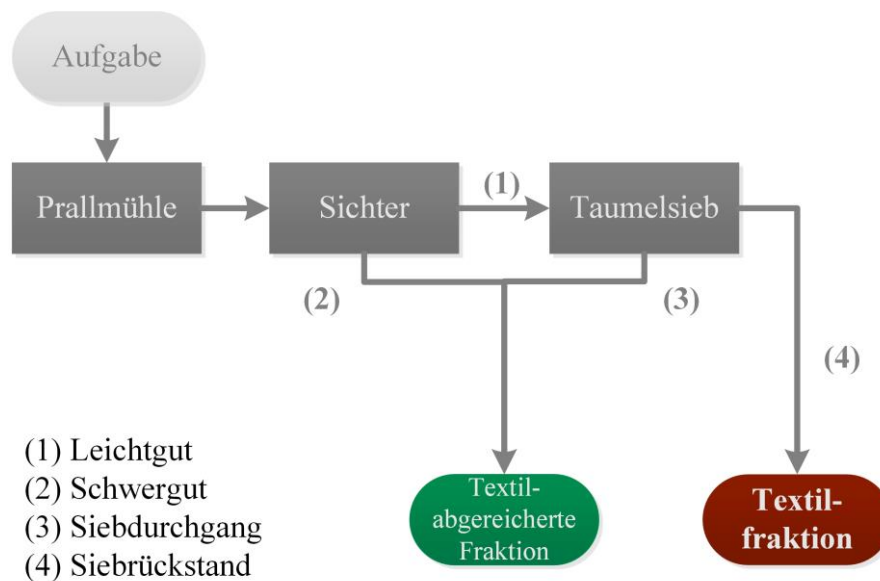


Abbildung 9: Verfahrensfließbild zur trockenen Abtrennung von textilen Anteilen aus Shredder-Sanden

Im zweiten Verfahrenstest wurde ein nasser Weg, der den hydrophoben Charakter der textilen Phasen und die Schaumbildungsfähigkeit des Shredder-Sandes zur Flotation nutzt, untersucht und entwickelt.

Bei der Flotation handelt es sich um Materialtrennung im Fein- und Feinstkornbereich nach dem Prinzip der Heterokoagulation.

Im Bereich der Rohstoffgewinnung erfolgt die Flotation zumeist als Schaumflotation. Der hydrophobierte Wertstoff koppelt sich, konditioniert durch ein Chemikalienregime, selektiv an Luftblasen an und wird aus der meist wässrigen Phase nach oben ausgetragen (vgl. bspw: [32]) Der Auswahl und Dosierung des Chemikalienregimes, die den Flotationsprozess unterstützen oder erst ermöglichen, kommt in der klassischen Flotation dabei eine tragende Rolle zu. Man unterscheidet die Chemikalien nach der Funktion während der Flotation und unterscheidet grob zwischen Sammlern, Reglern, Schäumern und Drückern. Eine ausführliche Erläuterung findet sich z.B. in [32].

Bei den Versuchen zur Dispergierung von Shredder-Sand in Wasser wurde beobachtet, dass die Trübe aus Shredder-Sand und Wasser zu einer deutlichen und stabilen Schaumbildung bei Blaseneintrag neigt, ohne dass zusätzliche Schaumbildner eingetragen werden.

Dies legte die Vermutung nahe, dass bestimmte Anteile im Shredder-Sand ähnliche Eigenschaften aufweisen, wie die Flotationshilfsmittel zur Hydrophobierung und zur Schaumbildung. Es wurde die Frage aufgeworfen, ob es sich dabei um ein auf alle Shredder-Sande übertragbares Phänomen handelt. Nach weiterführenden Versuchsreihen und

Recherchen kann diese Frage bejaht werden, solange am Shredder-Input auch ELV aufgegeben werden.

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten kann in der Anwesenheit von minimalen Rest-Öl- und Rest-Benzin-Mengen aus den trockengelegten Altfahrzeugen und ähnlichen Input-Stoffen gefunden werden. Zu Beginn der Entwicklung von Flotationsverfahren wurden Öle und ölhaltige Produkte als Sammler und Schäumer favorisiert. Folgt man den Ausführungen zur Dosierung solcher ölhaltigen Systeme, z.B. nach [36], wurden ölhaltige Substanzen in Größenordnungen zwischen 180 und 800 ppm eingesetzt. Diese Dosierung deckt sich mit Angaben zur mittleren Restmengen an Erdölprodukten (Öl und Benzin) in Altfahrzeugen [37]. Je nach Grundlage der überschlägigen Berechnung, ob mit 20 M-% Altfahrzeug im Input gerechnet wird oder mit 50 M-% Altfahrzeug-Anteile im Shredder-Rückstand (vgl. Kapitel 2.3) ergeben sich rechnerisch in Summe Restgehalte zwischen 160 und 410 ppm Öl und Benzin aus ELV in den Shredderrückständen. Die Öl- und Benzinreste könnten zur Bildung eines stabilen Schaumes und zur Austragung natürlich hydrophober bzw. favorisiert hydrophobisierter textiler Anteile in den Schaum führen.

Darüber hinaus wurde beobachtet, dass vor allem die die textilen Anteile der Shredder-Sande hydrophobe Eigenschaften besitzen. In der Kombination mit den Eigenschaften zur Schaumbildung wurde daher eine flotationsähnliche Abtrennung der textilen Bestandteile untersucht.

Abhängig von der Art des Eintrags und der Verteilung der Luft sowie der Art des Einbringens mechanischer Arbeit in Flotationssysteme kann apparateseitig zwischen Rührwerks- und pneumatischen Flotationsapparaten unterschieden werden. Die mechanischen Geräte bedienen sich einer mechanischen Energieeintragung. Die Luftblasen werden dabei über das Rührwerk eingetragen und verteilt. Pneumatische Flotationsapparate hingegen haben einen solchen Rührwerk nicht, sondern leiten die Luft z.B. durch eine poröse Membran und erzeugen dadurch feine Luftblasen.

In den Versuchen zur Einsetzbarkeit von Rührwerksflotationsanlagen waren die Kernproblematiken die aus der Benetzung bereits bekannte Tendenz zum abrasiven Verschleiß und darüber hinaus entstehende Blockierungen der Rühr- und Begasungseinheiten der Maschinen durch den Anteil an Draht und Textil.

Die Druckentspannungsflotation erzeugte in den Vorversuchen reproduzierbar zu kleine Blasen, die aufgrund der auftretenden Vielzahl zu zu großen Fehlausträgen im Bereich des Fein- und Feinstkorns (metallisch und mineralisch) führten.

Es wurde daher nach zahlreichen Versuchen die Variante der pneumatischen Flotationszellen als gangbare Konfiguration gewählt. Durch das Fehlen von mechanischen Bauteilen im Kontaktbereich zur Trübe finden keine Blockierungen und nur wenig Abrasion an der Gefäßwand statt. Die Blasen sind ausreichend groß und verteilt, um nicht zu viel Feinmaterial als Fehlaustrag auszuschleusen.

Die Ergebnisse der Versuche zur Flotationsdauer (s. Tabelle 5) zeigen, in welcher Dimension die Metalle in Flotatfraktion ausgetragen werden. Es ist ebenso ersichtlich, dass nach relativ kurzer Zeit keine nennenswerten Gehaltssteigerungen von Glühverlustträgern und Kohlenstoff zu verzeichnen ist.

Tabelle 5: Gehalte ausgewählter Elemente in der Flotatfraktion bei pneumatischer Flotation in Abhängigkeit von der Zeit

Zeit der Probennahme	GV / M-%	Al / ppm	Cu / ppm	Fe / ppm	Pb / ppm	Si / ppm	Zn / ppm	C / M-%	S / M-%
05min	27,78	25216	1981	177018	4372	103289	23996	14,48	0,4237
10min	29,48	23356	2165	183931	5041	97167	26456	16,33	0,4252
15min	30,06	22506	2251	180442	4929	95098	26217	16,6	0,4196
20min	30,71	21756	2268	173219	4772	90578	26095	17,3	0,4259
25min	30,46	22118	2396	187755	5044	94461	27768	17,14	0,4902
30min	31,74	21423	2402	179835	4859	92200	27456	18	0,4319
35min	30,87	22179	2339	182723	4563	97179	27368	17,47	0,4035
40min	31,77	25579	2379	181948	4416	97071	27727	17,97	0,4643

Für die industrielle Umsetzung kann auch auf bereits entwickelte Flotationskolonnen zurückgegriffen werden, wie sie beispielweise in [32] beschrieben werden oder durch die Firma MBE Coal & Mineral hergestellt und betrieben werden. Mittels zahlreicher Versuche zur Flotationsdauer und Verfahrensführung konnte eine Betriebsweise ermittelt werden, die einen guten Kompromiss zwischen der Maximierung der auszutragenden organisch-textilen Anteile und der Minimierung der Fehlausträge darstellt. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse in den großtechnischen Maßstab sollte allerdings im Rahmen einer Pilotanlage überprüft werden. Von Interesse dabei ist besonders die hydrodynamische Förderfähigkeit des Materials. Erste Untersuchungen an pneumatischen Flotationsmaschinen im Industriemaßstab der MBE zeigten, dass eine Übertragbarkeit deutliche Anpassungen an der Zusammensetzung

von Feststoff und Wasser notwendig machen und deutlich bessere Abtrennungsergebnisse erreicht werden können. Vor allem ist dabei zu beachten, dass Shredder-Sand-Wasser-Gemische in industriellen Flotationsanlagen bei Betriebsparametern, wie sie für Trüben einer Aufbereitung im Primärrohstoffbereich eingesetzt werden, eine unverhältnismäßig große Schaumzone ausbilden (s. Abbildung 10).



Flotatzone

Schaumzone

Absetzzone

Feststoff

Abbildung 10: Pneumatische Flotationszelle der MBE mit Beschickung aus Shredder-Sand. Auftretende Zonen innerhalb der Flotation sind voneinander abgetrennt

Als Ergebnis der Untersuchungen zur trockenen und nassen Flusenentfernung kann schlussendlich festgehalten werden, dass sowohl ein trockener als auch ein nasser Verfahrensweg zur Abtrennung der leichten Textilfraktion eingesetzt werden können. Durch den höheren maschinellen Aufwand des trockenen Verfahrens und der damit verbundenen höheren Kosten wurde mit Hinblick auf eine frühzeitige ökonomische Optimierung des Verfahrens allerdings die nasse Flotationsstufe in den Prozess integriert, da diese Trenneinheit eine einstufige Fahrweise ermöglicht, im Anschluss an die Benetzung angeschlossen werden kann und der anschließenden nassen Dichtentrennung auf einem Nassherd vorläuft. In Tabelle 6 sind die Trennergebnisse der trocken-mechanischen Abtrennung mit denen der Flotation im Vergleich ersichtlich. Als Indikatoren für den Austrag organischer (textiler) Anteile können der Glühverlust und der Kohlenstoff-Gehalt der Fraktionen herangezogen werden. In Tabelle 6 werden zum Vergleich der beiden möglichen Prozesswege (trocken-mechanische Abtrennung und Flotation) die Anteile an Glühverlust und Kohlenstoff-Ausbringen in den verschiedenen Fraktionen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass durch die trockene Verfahrensrouten eine Abreicherung des heizwertreichen organischen Anteils (durch Glühverlust identifizierbar) und des Kohlenstoffs in der Wertstofffraktion nicht im gleichen Maße wie bei der Flotationsvariante erfolgt. Wichtig dabei ist zu berücksichtigen, dass in diesem Schritt zunächst nur die textilen Anteile entfernt werden sollten. Das verbleibende Material („Textilbefreite Fraktion“) beinhaltet nach dieser Behandlung weiterhin Kohlenstoff und Glühverlustträger in Form von gröberen Kunststoffpartikeln, Lackresten und dergleichen.

Tabelle 6: Vergleich der trockenen und der nassen Abtrennung von textilen Anteilen aus Shredder-Sanden im Hinblick auf Masse, Glühverlust und Kohlenstoffgehalt im Rückstand.

Verfahrenstufe	Einheit	Prallmühle, Siehter & Taumelsieb		Flotation	
		Textiler Anteil	Textilbefreite Fraktion	Textiler Anteil	Textilbefreite Fraktion
Anteil von Aufgabe	M-%	0,96	99,04	10,3	89,7
Glühverlust	M-%	56,32	19,66	30,13	15,68
Kohlenstoff	M-%	16,29	9,22	15,46	7,61
Ausbringen Kohlenstoff	%	1,67	97,35	18,92	81,08

Die chemischen Analysen der einzelnen Fraktionen im Anschluss an die Versuche zeigten, dass durch die Flotation zwar ein Großteil der textilen Anteile entfernt werden kann, aber auch erhebliche Verschleppungen feinkörniger Metallpartikel in die Flotat-Fraktion zu einem zu großen Fehlaustrag an Wertmetallen in Form von feinstkörnigen Anhaftungen führt. Abbildung 11 zeigt ein typisches Bild der Flotatfraktion.



Abbildung 11: Flotat-Probe nach der Trocknung (Stereo-Mikroskop, trocken, 8-fache Vergrößerung)

Im Flotat können noch etwa 2,5 M-% Aluminium, 17 M-% Eisen und 2 M-% Zink nachgewiesen werden.

In anschließenden Untersuchungen zur Optimierung wurde ein Weg gefunden, die in dem Flotat befindlichen metallischen Fehlasträge durch eine nasse Siebung zu separieren, um so den Fehlaustrag weiter zu senken. Siebgehaltsanalysen und stereomikroskopische Untersuchungen legten nahe, dass diese Metalle größtenteils in feinkörniger Form vorliegen und als Anhaftung oder Agglomeration bzw. Einschluss an oder in den textilen „Flusen“ in die organische Fraktion ausgetragen werden. Durch den deutlichen Korngrößen-Unterschied zwischen Metallen und textilen Anteilen konnte die Korngröße als zielführendes Trennkriterium für die Ausschleusung der verbliebenen feinkörnigen Wertstoffe aus der

Textilfraktion identifiziert werden. Es wurden daher mehrere Reihen von Siebversuchen unternommen, um den Feinkornanteil abzutrennen und diesen wieder in den Aufbereitungsprozess zu integrieren.

Neben der Rückgewinnung von feinkörnigen Metallanteilen soll auf diese Weise auch eine Steigerung des Heizwertes der entsprechenden organischen Fraktion erreicht werden. Ein Großteil der heizwertarmen Anteile in der Textilfraktion besteht aus eben den feinkörnigen Anteilen aus Metall- und Mineralstoffen. Die ursprüngliche Messung des Heizwertes der Flotatfraktion ohne Absiebung ergab einen unteren Heizwert von etwa 5,55 MJ/kg.

Die Auswertung der Sieb-Versuche legte nahe, dass für einen optimalen Kompromiss aus Faserabtrennung und Fehlaustragsminimierung ein Trennschnitt bei 250 µm gewählt werden sollte. Durch diese Siebung werden zwei neue Fraktionen erzeugt: der Sieboberlauf ($\geq 250 \mu\text{m}$) und der Siebunterlauf ($\leq 250 \mu\text{m}$).



Abbildung 12: Flotat-Probe $\geq 250 \mu\text{m}$ nach Siebung und Trocknung (Stereo-Mikroskop, trocken, 6,5-fache Vergrößerung)

Der Sieboberlauf ist dabei die organikreiche Faserfraktion, die zur energetischen Verwertung ausgeschleust wird (siehe Abbildung 12). Der Siebunterlauf ist die mineralstoff- und

metallhaltige Teilfraktion, die zurück in den Prozess geführt werden kann. Die so auszuschleusende organikreiche Fraktion wird durch den zusätzlichen Siebschnitt auf 37 M-% der ursprünglichen Masse reduziert.

Die anschließenden Untersuchungen zur Heizwertbestimmung lieferten darüber hinaus die Erkenntnis, dass die Fraktion $\geq 250 \mu\text{m}$ nun einen oberen Heizwert (Brennwert) von mindestens 8 MJ/kg besitzt.

Der vollständige Prozess der Flotationsstufe ist in Abbildung 13 skizziert.

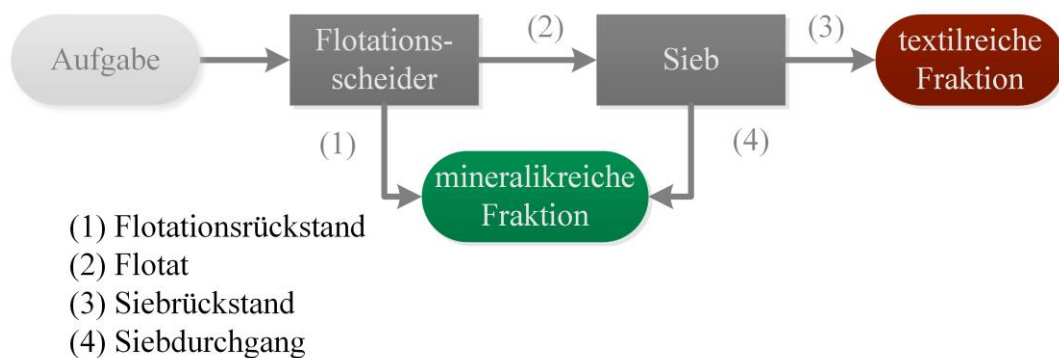


Abbildung 13: Verfahrensfließbilder Flotationsstufe zur Abtrennung der textilen Anteile aus Shredder-Sanden

5.1.2.2 Nassherd

Nachdem durch die Flotation und die anschließende Siebung des Flotats (mit Vereinigung Siebdurchgangs- und Flotationsrückstandsfraktion) der Hauptteil der textilen Anteile entfernt wurde, kann diese Fraktion zur weiteren Abreicherung von organischen (nicht textilen) Anteilen einer Sortierung durch einen schwingenden Hydroherd (im Folgenden „Nassherd“) zugeführt werden. Ein typisches Inputmaterial für die Nassherdstufe zeigt Abbildung 14.



Abbildung 14: Rückstand aus der Flotation als Input für Nassherdstufe aus Shredder-Sand (Stereomikroskop, trocken, 6,5fache Vergrößerung)

Nassherde sind Dichtentrenngeräte, bei denen das Leichtgut in einer Filmströmung aus Wasser über eine geneigte Herdfläche ausgetragen wird. Der Transport der Schwerfraktion erfolgt über eine kontinuierliche schlagende und stoßende Bewegung in Längsrichtung der Herdfläche. Durch die unterschiedlichen Dichten setzt sich das Schwergut schnell ab und kann durch die Reibungskräfte des Tisches in die Schlagrichtung befördert werden, wohingegen das Leichtgut in der Filmströmung mit wenig bis gar keinem Kontakt zur Herdfläche abgetragen wird. Zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der wässrigen Dünnschicht wird über die Länge der Aufgabeseite des Herdes ein zusätzlicher Querwasserstrom aufgegeben.

Die genaue Funktionsweise ist in Abbildung 15 ersichtlich.

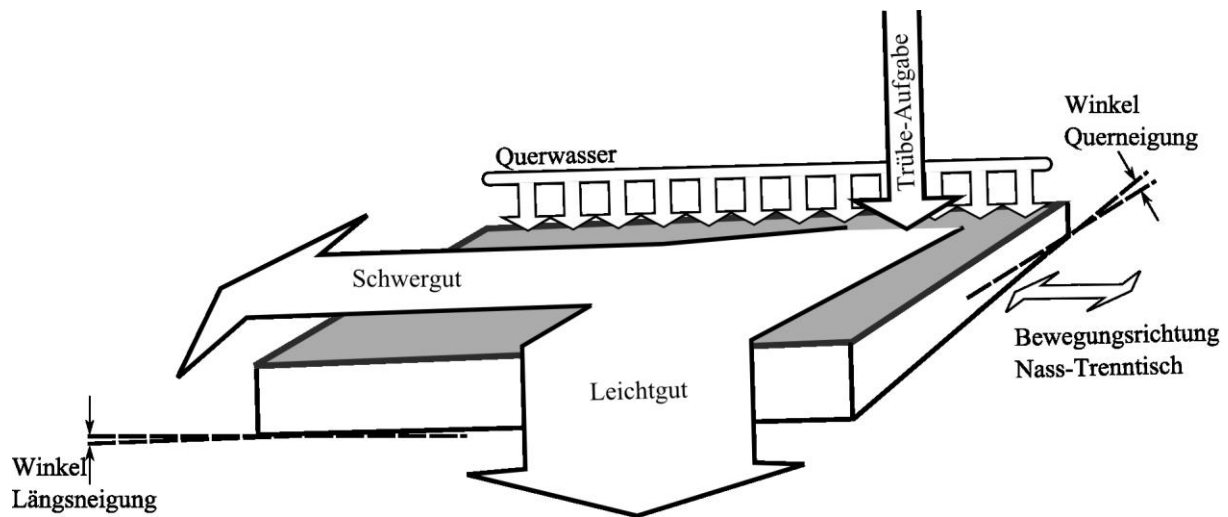


Abbildung 15: Schematische Skizze zur Funktion eines Nassherdes oder Nasstrenntisches mit Bezeichnungen zur Neigung, Aufgabe und Austrag der Fraktionen

Durch die Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus [1] auf ein hoch skalierbares Nassherd-Aggregat neuerer Ausführung mit einer deutlich größeren Herdfläche ergaben sich neue Erkenntnisse. Der im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen genutzte Nassherd ist ein industrienahes Technikumsgerät der Fa. Holman & Wilfley, der ursprünglich zur Golderzaufbereitung genutzt wird. Anders als der in den Voruntersuchungen genutzte Herd der Fa. KHD Humboldt Wedag AG mit einer Herdfläche von 0,05 m², einem Schwerfraktion-Austrag und drei Leichtgut-Austrägen, besitzen moderne Nassherde wie der in dieser Arbeit eingesetzte eine Herdfläche von 2 m², einen Leichtgutaustrag und vier Schwergut-Austräge. Dadurch ergeben sich für den Betrieb auch geänderte Parameter bezüglich z.B. Wasserdurchsatz oder Neigung: konnte der Herd von KHD noch über zwei separat einstellbare Achsen in der Längs- und Querneigung justiert werden, so hat der Herd der Firma Holman & Wilfley eine kombinierte Neigungsachse, über die ein festes Neigungsverhältnis beibehalten wird. Auch werden hier statt Rillen Leisten als Lenkungshilfen eingesetzt.

Die grundsätzlichen Unterschiede des benutzten Herdes für diese Untersuchung und des benutzten Herdes der Voruntersuchungen (s.o.) erforderten, dass die Betriebsparameter wie Neigung, Querwasserstrom und Aufgabevolumenstrom vollständig neu ermittelt wurden.

Aufgrund der Charakteristika des Materials (große Spreizung des Kornbandes, Heterogenität in Dichte und Kornform) konnte für die Einstellungen des Herdes hinsichtlich Hubzahl, mittlerem Hub und Neigung nur bedingt auf die in der Literatur gängigen Betriebsparameter (vgl. [32]) zurückgegriffen werden. Zwar legt das Material mit der Korngröße ≤ 1 mm die Betriebsparameter eines Herdes zur Sandaufbereitung nahe, allerdings musste eine

Querneigung eingestellt werden, wie sie üblicherweise für den Betrieb eines Herdes zur Schlammaufbereitung bekannt ist. Als optimale Betriebsparameter für textilabgereicherten Shredder-Sand hat sich im Bereich der Aufgabetrübe ein Mischungsverhältnis von Feststoff zu Wasser mit 1:3 ergeben. Die Aufgabemenge betrug 4 l/min Trübe bei einem Querwasserstrom von 40 l/min. Als Neigung (Querneigung) wurde ein Einstellwinkel von 1,4 ° ermittelt, wie bei Herden für die Schlammaufbereitung üblich.

Der mittlere Hub wurde im Übergangsbereich von Feinsand (Korngrößen um 0,2-1 mm) und Schlamm (Korngrößen < 0,2 mm) bei etwa 12 mm gewählt. Dem breiten Kornband des Aufgabematerials folgend, stellt sich eine geringe Hubzahl von 270-280 min⁻¹ als optimal dar.

Es wurde damit ein Schwergut erzeugt, das einen Großteil der Wertmetalle und der silikatischen Bestandteile beinhaltet, bei gleichzeitiger Abreicherung der Glühverlustbestandteile und des Kohlenstoffs.

Das Leichtgut (siehe Abbildung 16) ist eine glühverlust- und kohlenstoffreiche Fraktion. Ähnlich der Untersuchungen zur weiteren Aufbereitung der Flotat-Fraktion (vgl. Abbildung 13) wurden auch hier Untersuchungen zur Rückführung von feinkörnigen Metallen mittels Siebschnitt unternommen. Aufgrund von Wechselwirkungen mit der Kornform während der Dichtentrennung werden diese Partikel trotz der größeren Dichte in die Leichtgutfraktion ausgetragen. Es stellte sich heraus, dass die Möglichkeiten zur Trennung von metallischen und organischen Bestandteilen in dieser Fraktion durch einen Siebschnitt sehr begrenzt sind. Stereomikroskopische Untersuchungen und Siebgehaltsanalysen des Nassherd-Leichtguts bestätigten die Schwierigkeit, dass die metallischen Bestandteile über viele Korngrößenklassen verteilt vorliegen und so nicht gezielt in eine bestimmte Siebfraktion ausgebracht werden können. Da dieser zusätzliche Verfahrensschritt somit kein ausreichendes Optimierungspotential bietet, wurde er nicht in das Verfahren übernommen. Das Material hat allerdings bereits in dieser Form einen unteren Heizwert von 12,26 MJ/kg.



Abbildung 16: Leichtgut-Fraktion der Nassherdstufe (nach Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)

Die als Nassherd-Schwergut bezeichnete Fraktion stellt sich als organikabereicherte Fraktion dar, die neben metallischen Anteilen überwiegend Eisenoxide, Quarz und silikatische Bestandteile enthält.

Die Gegenüberstellung der Materialgehalte stellt Tabelle 7 dar:

Tabelle 7: Gehalte der Fraktionen nach Nassherd (NH) im Vergleich zu dem Inputmaterial in die entsprechende Stufe im Schwergut (SG) und Leichtgut (LG)

	GV	Al	C	Cu	Fe	Si	Zn
Aufgabe NH / M-%	16,75	2,13	7,97	1,14	22,8	14,13	1,74
Anteil im SG / M-%	8,67	1,85	3,76	1,14	28,32	14,30	1,68
Anteil im LG / M-%	43,10	2,37	22,15	0,18	12,63	6,77	2,05
Ausbringen in SG / %	47,82	78,05	43,61	96,62	91,08	90,59	78,91
Ausbringen in LG / %	52,18	21,95	56,39	3,38	8,92	9,41	21,09

Es ist zu erkennen, dass die wesentlichen Ziele erreicht wurden: Die glühverlustreichen Anteile der Fraktion konnten in der Leichtgut-Fraktion aufkonzentriert und der Kohlenstoff-Gehalt der metallhaltigen Schwergutfraktion weiter gesenkt werden. Eisen und Kupfer, aber auch Silizium konnten bevorzugt in der Schwergutfraktion angereichert werden.

Die kombinierten Organik-Fractionen (Mischung aus Flotat und Nassherd-Leichtgut) besitzen einen Heizwert $> 11 \text{ MJ/kg}$ und erreichen damit die formalen Kriterien, um bei Einsatz in geeigneten thermischen Prozessen der energetischen Verwertung zugeordnet werden zu können. Auf diese Weise können die ersten 24 M-% des Shredder-Sandes einer weiteren Verwertung zugeführt werden.

Da entsprechend der Analysen fast ein Drittel der erzeugten Schwergut-Fraktion aus eisenhaltigen Materialien besteht, ist es sinnvoll diese abzutrennen, bevor weitere Trennschritte folgen.

5.1.3 Abtrennung eisenhaltiger Bestandteile

Für die Abscheidung magnetischer Bestandteile wurde die Abtrennung mittels nassem Mittelfeld-Magnetscheider erfolgreich untersucht. Bereits in den Voruntersuchungen wurde deutlich, dass für die Untersuchung zur Abtrennung eisenhaltiger Stoffe in Korngrößen $< 1 \text{ mm}$ aus dem zuvor erzeugten Materialmix ein leistungs- und durchsatzstarker Mittelfeld-Magnetscheider erforderlich ist. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde ein entsprechendes Gerät (Permos PMS 602, Fa. KHD) eingesetzt, der für nasses Aufgabematerial verschiedene Relativbewegungsrichtungen von Aufgabegut und Ausheberichtung (Gleich- und Gegenstrom) ermöglicht. Nach den zuvor beschriebenen Behandlungsstufen konnte so durch den Einsatz dieser Mittelfeld-Magnetscheider-Stufe eine Fraktion erzeugt werden, die eine deutliche Anreicherung eisenhaltiger Stoffe aufweist. So kann in einem Trennschritt ein Konzentrat mit 37 M-% Eisen erzeugt werden. Diese Fraktion macht etwa 40 M-% der Aufgabemasse aus und enthält etwa 75 % des im Material enthaltenen Eisens.

Nach bilateralen Gesprächen mit einigen potentiellen Abnehmern der eisenbasierten Fraktion konnte mit einem Hochofenbetrieb für die Herstellung von Gusseisen eine grundsätzliche Übereinkunft an die Materialqualität getroffen werden. Eine Hauptanforderung war die Erhöhung des Anteils der eisenhaltigen Stoffe und damit die Schaffung eines Konzentrates, welches mindestens 50 M-% Eisen enthält. Dazu war es notwendig, in der Stufe der Magnetscheidung eine zusätzliche Reinigungsstufe zu implementieren, damit die Eisengehalte

im produzierten Material den Anforderungen des Hochofenbetriebs entsprechen. Auch wurde eine Liste mit Störstoffen und ihren maximal akzeptierbaren Gehalten übermittelt (s. Tabelle 8).

Tabelle 8: Übernahmekriterien für eisenhaltige Reststoffe der DK Roheisen (Stand: 03.08.2009)

Element	möglicher Gehalt	optimaler Gehalt	Bemerkung
	[% TS]	[% TS]	
Fe	0-100	40-100	
C	0-90	0-10	
SiO ₂	0-100	0-20 oder 70-100	
CaO	0-30	0-20	
MgO	0-35	0-5	
Al ₂ O ₃	0-25	0-5	
P	0-30	0-0,1 oder 3-30	bei P >3 % sollten Cr/Cu niedrig liegen
Cr	0-0,5	0-0,1	
Cu	0-2	0-0,5	
Ti	0-3	0-0,3	
Mn	0-12	0-1	
As, Sb	0-0,10	0-0,010	
Ni	0-4	0-0,1	
Mo, V	0-1,5	0-0,1	
Na ₂ O	0-3	0-1,5	Die Summe aus Na ₂ O und K ₂ O darf den maximalen Gehalt nicht überschreiten.
K ₂ O	0-3	0-1,5	
Zn	0-15	0-3	
Pb	0-5	0-0,5	
Cl	0-5	0-0,5	
F	0-4	0-0,1	
S	0-5	0-0,5	
Hg	<0,0001	<0,0001	
Cd	0-0,10	0-0,10	
Tl	0-0,035	0-0,035	
Cr ^(VI)	nicht nachweisbar	nicht nachweisbar	
Öl/Fett	0-6	0-1	

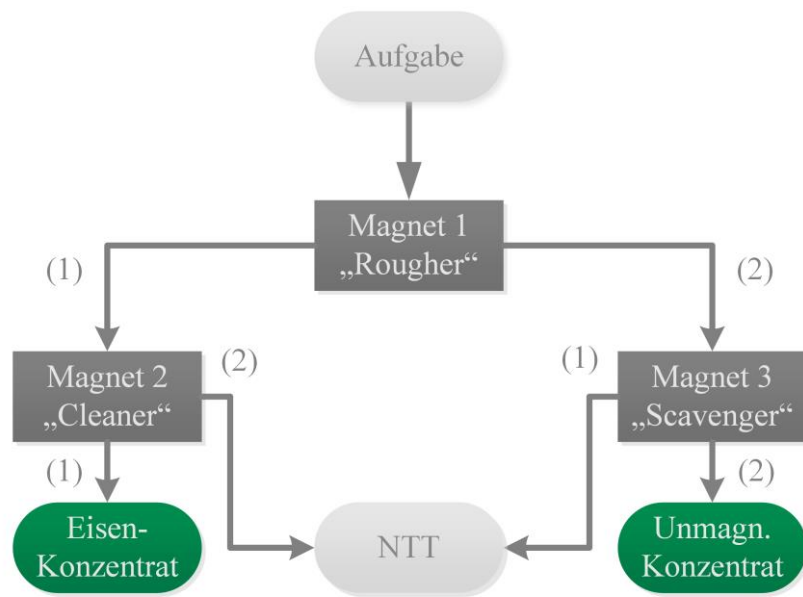
Zur Steigerung des Eisengehalts im Konzentrat wurde daraufhin eine Fahrweise mit Rougher-, Cleaner- und Scavengerstufe installiert und das Optimierungspotential überprüft. Die Abgänge der Cleanerstufe (unmagnetisch bzw. schwachmagnetisch) und das magnetische Zwischenprodukt der Scavenger-Stufe weisen noch, wie in Tabelle 9 ersichtlich, relativ hohe Gehalte an Organik-Komponenten auf und wurden daher nicht auf die Rougher-Stufe zurückgeführt, sondern auf die vorgelagerte Nassherd-Stufe zur erneuten Ausschleusung der organischen Bestandteile. Im Labor- und Kleintechnikumsmaßstab ließen sich keine kompletten Kreisläufe realisieren. Im Pilotmaßstab wäre dies realisierbar. Ggfs. wäre dort

auch die Dichtentrennung auf dem Nasssherd mehrstufig durchzuführen, um eine Verschleppung von Organikkomponenten in die Fe- und Mineralik-Vorkonzentrat zu unterbinden.

Tabelle 9: Übersicht ausgewählter Elemente im In- und Output der Magnetscheiderstufen

Aufgabe		Produkte			
		Zwischen- produkt Scavenger	Abgänge Cleanerstufe	Eisen- Konzentrat	NE-Konzentrat
GV / %	8,67	13,91	14,00	7,10	9,07
Al / %	1,88	1,71	2,14	0,81	2,75
C / %	3,69	5,70	5,83	2,87	4,13
Cu / %	1,35	0,31	0,52	0,29	0,88
Fe / %	29,53	36,68	29,99	51,14	10,10
Pb / %	0,43	0,24	0,30	0,14	0,42
Si / %	14,05	6,07	9,91	3,38	24,31
Zn / %	1,66	3,00	3,02	1,27	1,48

Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Verfahrensführung durchgängig für alle Shredder-Sand-Inputvarianten ein grundsätzlich für den Hochofenbetrieb einsetzbares Material erzeugt. Die Einsetzbarkeit bezieht sich sowohl auf den Eisengehalt, wie auch auf den Anteil vorhandener Störstoffe. Die so ausgelegte Verfahrensführung für die Magnetscheidung ist in Abbildung 17 dargestellt:



(1): Magnetischer Materialstrom
 (2): unmagnetischer Materialstrom
 NTT: Nasstrenntisch

Abbildung 17: Verfahrensfliessbild Magnetscheider-Stufen, wobei (1) für magnetische Stoffströme steht und (2) für unmagnetische Stoffströme

Das so erzeugte Eisen-Konzentrat enthält rund 52 M-% Eisen und macht rund 26 M-% der ursprünglich eingesetzten Masse aus. Rund 73 % des Eisens lassen sich in einem solchen vermarkt- und verwertbaren Konzentrat ausbringen. Eine bildliche Darstellung der gewonnenen Fraktion gibt Abbildung 18:



Abbildung 18: Eisen-Konzentrat (nach Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)

Weitere Versuche bei Maschinenherstellern im Rahmen der Aggregatsabfrage (s. Kapitel 6.3.2.3) stellten auch noch deutlich höhere Fe-Gehalte in Aussicht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind als Anlage 4 der Arbeit angefügt.

5.1.4 Kupfer-Abtrennung

Im nächsten Verfahrensschritt werden die Kupferpartikel aus der nicht magnetischen Fraktion der vorhergehenden Verfahrensstufe durch selektive Zerkleinerung und Siebung ausgeschleust. Es handelt sich bei dem vorliegenden Kupfer zumeist um feine Kupferdrähte der elektronischen und elektrischen Bauteile von Fahrzeugen und Haushaltsgroßgeräten. Durch die vorgeschalteten Post-Shredder-Technologie (VW-SiCon-Verfahren) verbleiben im Shredder-Sand der hier untersuchten Korngrößen-Klasse hauptsächlich Litzenkupfer mit hohem Längen-zu-Durchmesser-Verhältnis, wobei die Länge zwischen einem und zehn Millimeter und der Durchmesser auf wenige zehntel Millimeter approximiert werden kann.

Zur Abtrennung der Kupferlitzen wurden unterschiedlichste Untersuchungen durchgeführt. Neben Versuchen, die Kupferlitzen mittels Siebung aus dem Produktstrom auszuschleusen,

wurden auch neuartige Trennaggregate auf ihre Einsetzbarkeit geprüft: Es wurden Verfahren zur Kornformsortierung auf neu entwickelten Aggregaten an der TU Bergakademie Freiberg getestet, um Aussagen und Grundlagen für die Weiterentwicklung oder Adaption der geplanten Kornformseparationsstufe und den damit verbunden Bau eines speziellen Gerätes zu erhalten. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass dieser Weg zu zu hohen Ausbringungsverlusten führt. Weitere Trenntests wurden auf einem Korona-Walzenscheider (ESTA-Trennung) und auf dem neu entwickelten Barrierenwirbelstromscheider der Fa. Exner, der auf dem Prinzip der Wirbelstromscheidung für den Feinkornbereich basiert, durchgeführt.

Bei der Korona-Walzenscheidung werden feinkörnigen Gemische aus elektrisch leitenden und nichtleitenden Partikeln in einem elektrischen Feld zwischen einer Sprühelektrode und einer geerdeten Metallwalze gleichmäßig aufgeladen. Durch Kontakt mit der sich drehenden Walze können die leitenden Partikel die Ladung abgeben und werden gemäß einer normalen Flugparabel von der sich drehenden Walze abgeworfen. Die Nichtleiter verlieren durch ihren Kontakt mit der Walze die Ladung nicht und haften länger an der Walze. Diesen Effekt macht man sich zur Trennung zunutze. Die Ergebnisse der Korona-Walzenscheider-Untersuchungen zeigten bei entsprechend angepassten Betriebsparametern gute Trennergebnisse über das volle Korngrößenband $< 1 \text{ mm}$. Diese konnten allerdings nur erreicht werden, wenn das Aufgabematerial zuvor vollständig getrocknet wurde. Durch den zusätzlich notwendigen Energieaufwand, der benötigt würde, um die entsprechende Fraktion aus dem nassen Prozess zu trocknen, wurde dieser zusätzliche Verfahrensschritt mit Hinblick auf die ökonomische Zumutbarkeit des Prozesses nicht weiter verfolgt.

Der Barrierenwirbelstromscheider als Trennaggregat für elektrisch leitende und nicht-leitende Teile nutzt, wie jedes Gerät zur Wirbelstromsortierung, die Verbindung des Induktionsgesetzes (Erzeugung eines elektrischen Feldes durch ein zeitlich verändertes Magnetfeld) und dem Biot-Savartschen Gesetz (ein Stromleiter baut ein magnetisches Feld auf) (vgl. [32]). Die beiden entstehenden Magnetfelder sind einander entgegengerichtet, was eine Abstoßung zur Folge hat, die zur Trennung ausgenutzt werden kann. Beim Barrierenwirbelstromscheider erfolgt eine horizontale Bewegung mit einer dazu rechtwinkligen Abstoßungsrichtung entgegen der Schwerkraft, die durch schrägen Einbau der Magnettrommel derart gesteuert werden kann, dass die leitenden Materialien aus dem Materialmix ausgehoben und zur Seite befördert werden. Die Versuche mit dem Barrierenwirbelstromscheider zeigten gute Ergebnisse für Shredder-Sand-Partikel mit Korngrößen von $1\text{-}0,5 \text{ mm}$. Allerdings musste hier festgestellt werden, dass der

Barrierenwirbelstromscheider als Trennaggregat für Shredder-Sande Schwächen in der Behandlung feiner, litzenförmiger Metalle hat. Da im Prozess keine ausreichende Verkugelung der Metalle stattfindet, liegen diese immer noch größtenteils litzenförmig vor und bilden formspezifisch kaum Möglichkeiten für das Angreifen der Magnetfelder. Zudem ist auch für den Einsatz eines Wirbelstromscheiders eine Trocknung des Materials im Vorfeld erforderlich, wenngleich diese nicht so vollständig erfolgen muss wie für den Einsatz eines Korona-Walzenscheiders.

Daher wurde ein Ansatz zur selektiven Zerkleinerung mit dem Ziel einer nachgeschalteten sortierenden Klassierung gewählt. Grundlage dafür sind die grundsätzlich unterschiedlichen Materialeigenschaften der voneinander zu trennenden Stoffe: Während Metalle einen duktilen Charakter aufweisen und bei mechanischer Belastung eine Verformung erfahren, weisen silikatisch-mineralische Materialien überwiegend sprödes Verhalten auf und neigen bei Belastung eher zu Bruchverhalten. Die in den Voruntersuchungen erarbeiteten Ergebnisse zeigten die grundsätzliche Möglichkeit dieser Vorgehensweise auf. Allerdings müssen zahlreiche Betriebsparameter validiert und berücksichtigt werden. Zum einen müssen die Kupferlitzen ausreichend ausgewalzt werden, um von einer länglichen Kabelform eine plättchenhafte Form anzunehmen, zum anderen dürfen sie jedoch nicht so sehr beansprucht werden, dass sie ausfasern und zerfallen. Der Notwendigkeit der begrenzten Mahldauer ist gegenläufig, dass für die silikatischen Bestandteile eine lange Mahlzeit zu verbesserten Zerkleinerungsergebnissen führt. Hier musste in den Untersuchungen ein Mittelmaß empirisch bestimmt werden. Durch anschließende Siebung kann der feinkörnige silikatische Anteil von Metallanteilen in größeren Korngrößenklassen getrennt und ein Kupferkonzentrat als Siebrückstand erzeugt werden. Von Vorteil war, dass eine Nassvermahlung und -siebung direkt im Anschluss an eine nass durchführbare Magnetscheidung erfolgen kann. Durch die Kooperation mit der Bauhaus Universität Weimar wurden unter dem Aspekt der Wiedereinsatzbarkeit einer mineralikreichen Aufbereitungsfraktion als Material zur Herstellung von Blähgranulaten Anforderungen an das mineralische Material definiert, die zum einen die Inhaltsstoffe betreffen, zum anderen aber auch die Korngröße. Das Haupterfordernis war, dass die mineralische Fraktion in seiner Korngröße auf $< 100\ \mu\text{m}$ beschränkt ist. Dies wurde durch eine adaptierte Mahldauer und den Einsatz eines Schutzsiebes mit Maschenweiten von $100\ \mu\text{m}$ erreicht. Die Kupferfraktion, die sich im Siebrückhalt $> 250\ \mu\text{m}$ sammelt, ist in Abbildung 19 dargestellt:



Abbildung 19: Kupferkonzentrat > 250 µm (nach der Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 20fache Vergrößerung)

Die Fraktion > 250 µm hat einen Kupferanteil von 55 M-% und ist hüttengängig.

Die Fraktion 100-250 µm ist eine noch mit Kupfer angereicherte, mineralische Fraktion, die in einer zweiten Mahlung und Siebung bei 100 µm behandelt wird. Dadurch ergeben sich zwei neue Fraktionen: ein Kupferkonzentrat > 100 µm mit Kupfergehalten um 8 M-%, das hüttengängig ist, und eine mineralische Fraktion.

Abbildung 20 zeigt den vollständigen Prozess der kombinierten Mahl- und Siebstufe.

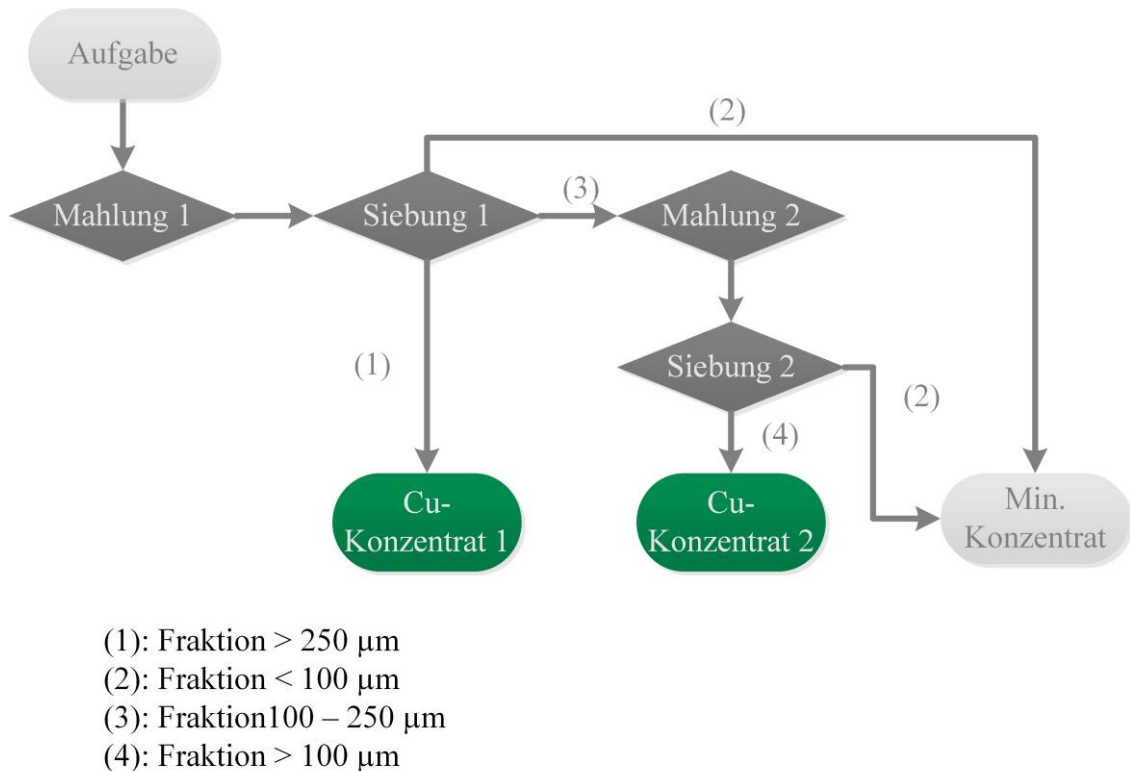


Abbildung 20: Flussdiagramm Mahlung und Siebung

Durch dieses Vorgehen fallen zwei Kupferkonzentrate an: Ein Kupferkonzentrat $> 250 \mu\text{m}$ (55 M-% Kupfer) und ein Kupferkonzentrat $100-250 \mu\text{m}$ (8 M-% Kupfer). In Summe wird in diesem Schritt ein Kupfer-Konzentrat mit rund 35 % Kupfergehalt hergestellt, dass 1 M-% der ursprünglichen Gesamtmasse ausmacht. Bezogen auf den Kupfergehalt der Ausgangsmasse der Shredder-Sande können durch diesen Schritt rund 65 % des vorhandenen Kupfers ausgebracht werden.

5.1.5 Chemische Metallabtrennung

5.1.5.1 Laugung zur Erzeugung einer metallarmen, mineralischen Fraktion

Das nun zur Aufbereitung verbleibende Material ist eine feinkörnige mineralische Fraktion mit Korngrößen $< 100 \mu\text{m}$, das mit dem Ziel des Einsatzes im Baustoffbereich konditioniert werden sollte.

Da durch die Korngröße eine weitere nass-mechanische Aufbereitung mit dem Ziel der nahezu vollständigen Metall-Ausschleusung nicht möglich ist (siehe dazu [32]), muss die weitere Aufbereitung in eine nass-chemische Behandlungsrouten überführt werden.

Durchgeführt wurde die Trennung mittels Laugung. Durch die Unlöslichkeit des Siliziums bei Behandlung mit moderaten Säure- oder Laugenkonzentrationen während Metalle hingegen in

unterschiedlichem Maße durch Säuren oder Laugen gelöst werden können, wurde hier der adäquate Weg gesehen, die weitere Trennung von feinstkörnigen silikatischen und metallischen Bestandteilen durchzuführen.

Die Voruntersuchungen hatten nahe gelegt, dass die Shredder-Sande einen erhöhten Anteil an Karbonaten beinhalten würden. Durch die in diesen Untersuchungen bereits etablierten Vorabscheidungen von organischen, eisen- und kupferhaltigen Fraktionen wurde die Frage der Notwendigkeit einer zusätzlichen Karbonat-Abtrennung aufgeworfen. Es wurden daher Untersuchungen zum Karbonatgehalt der überwiegend inerten Fraktion (Material < 100 µm aus dem vorhergehenden Behandlungsschritt) gemacht, um Aussagen über potentielle Säureverbraucher für die geplanten Laugeversuche zu erhalten. Mit C-Gehalten aus Karbonaten in der Größenordnung von 0,5 % bis 1,0 % ist der Karbonatanteil so gering, dass eine Vorabtrennung von Karbonaten etwa durch spezielle Flotation vor Laugung unnötig ist.

Das Material kann also ohne Zwischenschritt zur Karbonatabtrennung nass-chemisch aufgeschlossen werden. Der Aufschluss soll dazu dienen, die noch vorhandenen metallischen Inhaltsstoffe über die Laugung zurückzugewinnen und das mineralische Material für den Einsatz im Baustoffbereich zu konditionieren. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf Kupfer und Zink als potentielle Wertmetalle gelegt, die zurückgewonnen werden sollen. Darüber hinaus sollen auch Eisen, Blei, Nickel und Cadmium in Lösung überführt werden, um die Grenzwerte für Baustoffe einhalten zu können. Die ersten Untersuchungen zu Metallgehalten in der mineralischen Fraktion der Shredder-Sande wurden mit Hinblick auf die Einsetzbarkeit im Rahmen der durch Vorgaben der Landesarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) definierten Zuordnungswerte zum eingeschränkten Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen (LAGA Z2) vorgenommen.

Der Vergleich ausgewählter nach der LAGA Mitteilung 20 (M 20) als Z2 definierten und der in der mineralischen Fraktion der Shredder-Sande vorhandenen Metallgehalte ist in Tabelle 10 dargestellt:

Tabelle 10: Vergleich der Grenzwerte nach LAGA M 20 Z2 und der vorhandenen Fracht in der mineralischen Fraktion vor Laugung der Shredder-Sande für ausgewählte Metalle

Element	Im Shredder-Sand < 1 mm /ppm	In mineralischer Fraktion aus Shredder- Sanden / ppm	Zulässig nach LAGA Z2 / ppm
Cd	59	65	10
Cr	709	1197	600
Cu	8286	2103	600
Ni	798	693	600
Pb	2880	4121	1000
Zn	16303	15278	1500

Es ist ersichtlich, dass alle aufgeführten Metalle über den zulässigen Grenzwerten der LAGA M20 Z2-Werte liegen und so als Baustoffe auch für den Bereich Z2 nicht eingesetzt werden können.

Zur Laugung der Buntmetalle wurden in einem ersten Schritt Tastversuche mit unterschiedlichen Laugelösungen durchgeführt. Die Laugung des hauptsächlich silikatischen Produktstroms dient dabei zweierlei Zielstellungen: zum einen sollen Buntmetalle aus dem mineralischen Material ausgelöst werden, um diese in einem nächsten Schritt per Extraktion zurückzugewinnen. Zum anderen wird so das mineralische Material hinsichtlich seiner Zusammensetzung zum Einsatz als Recycling-Baustoff konditioniert. Von besonderem Interesse sind dabei die Grenzwerte für bestimmte Stoffe, die in den gesetzlichen Grundlagen LAGA Mitteilung 20 (November 1997) für Bauschutt vor der Aufbereitung und nach EP der LAGA Mitteilung 20 (August 2004) für den Abfalleinsatz in Produkten, bzw. für RC-Baustoff aus aufbereitetem Bauschutt RC-3 sowohl im Feststoff als auch im Eluat gefordert sind. Die entsprechenden Elemente und deren Grenzwerte können Tabelle 12 und Tabelle 13 entnommen werden.

Unter Berücksichtigung der derzeit gängigen technischen Varianten der Industrie sowie eigener Untersuchungen unter Berücksichtigung der chemischen Eigenschaften wurden als Laugesysteme verschiedene Säuren, Säure-Systeme und zwei Basen gewählt. Die betrachteten Laugesysteme waren Salzsäure (HCl), Salpetersäure (HNO₃), Schwefelsäure (H₂SO₄), Schwefelsäure mit Wasserstoffperoxid (H₂SO₄ + H₂O₂), Schwefelsäure mit Essigsäure (H₂SO₄ + C₂H₄O₂) sowie Natronlauge (NaOH) und Ammoniak (NH₄OH). In den Vorversuchen mit Schwefelsäure wurde Blei in viel zu geringen Mengen in die Lösung

überführt, da hier schwerlösliches Bleisulfat gebildet wird. Mit Natronlauge oder Ammoniak wurden nur Aluminium und Zink und geringe Mengen an Kupfer in die Lösung überführt. Aufgrund des geringen Metall-Ausbringens bei Einsatz von Natronlauge und Ammoniak wurde daraufhin ganz auf weitere Untersuchungen mit diesen Laugesystemen verzichtet.

In den Untersuchungen zur Optimierung des Laugeprozesses wurden unterschiedliche Parameter der Laugung untersucht. So wurden unterschiedlich starke Konzentrationen von Säure auf ihre Einsetzbarkeit überprüft, sowie der Einsatz von Oxidationshilfsmitteln (Wasserstoffperoxid H_2O_2). Auch die Laugedauer und die Temperatur wurden einer kritischen Überprüfung unterzogen.

In einem ersten Schritt wurde untersucht, welche Laugesysteme bei dem heterogenen Stoffgemisch die besten Abtrennungsergebnisse möglichst vieler Metalle erbringen. Die Abbildung 21 zeigt die zu erreichenden Gehalte ausgewählter Metalle in den festen Laugerückständen und die Grenzwerte nach LAGA Z2 zur Orientierung.

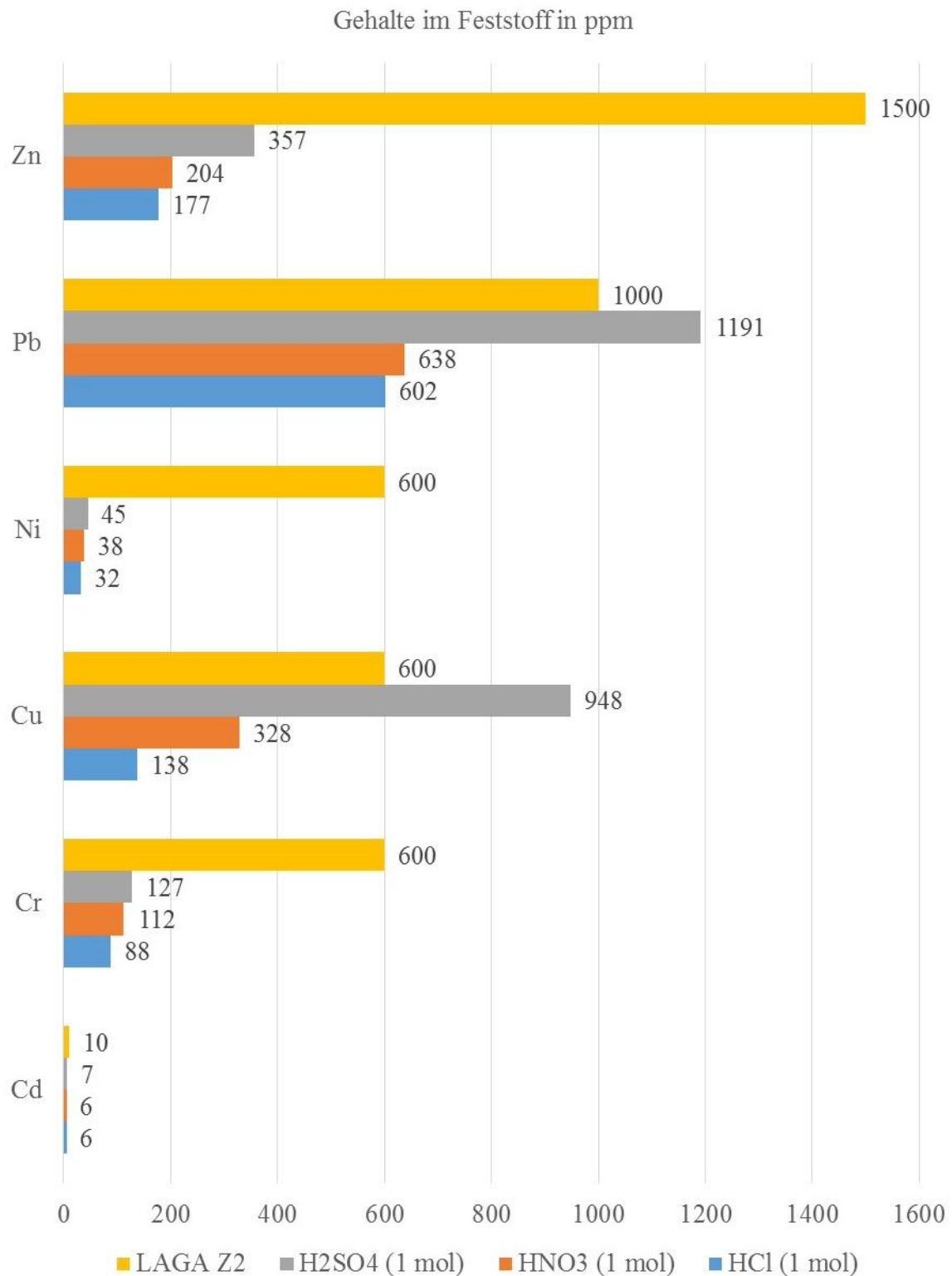


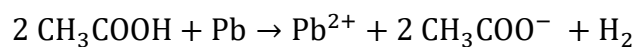
Abbildung 21: Gehalte ausgewählter Metalle im festen Laugerückstand nach 120 minütiger Laugung bei 90 °C mit Schwefelsäure (1 mol), Salpetersäure (1 mol) und Salzsäure (1 molar). Als Richtwerte sind die Grenzwerte der LAGA Z2 aufgeführt

Es ist ersichtlich, dass die Systeme mit Salzsäure und mit Salpetersäure die zu erreichenden Grenzwerte der hier untersuchten Metalle erreichen. Es ist interessant, dass die Reduzierung der Bleikonzentration mit Salzsäure entgegen der Erfahrungen in anderen Fällen hier bereits

bei mäßiger Erhöhung der Temperatur, die zu einer verbesserten Löslichkeit von Bleichlorid führt, erreicht wurde. Die Versuche mit Schwefelsäure konnten, wie aufgrund der Bildung von Blei^{II}-Sulfat zu erwarten, die Vorgaben der Grenzwerte im Bereich Blei nicht erreichen.

Im Überblick kann festgehalten werden, dass die Versuche mit 1 molarer Salz- und 1 molarer Salpetersäure die effektivsten Laugesysteme darstellen. Salzsäure erzielte dabei in den untersuchten Systemen prozentuale Abtrennungen (auf den Inhalt der trockenen Ausgangsmenge gerechnet) von bis zu 100 % des Kupfers, 92 % des Eisens, 46 % des Bleis und 84 % des Zinks, die in Lösung gingen. Salpetersäure erreichte Lösemengen (auf die trockene Ausgangs-Fraktion bezogen) von maximal 93 % Kupfer, 66 % Eisen, 53 % Blei und 84 % Zink. Vergleicht man diese Werte mit denen der 1 molaren Schwefelsäure, die Ausbringen von 74 % Kupfer, 77 % Eisen, 3 % Blei und 98 % Zink erzielte, ist festzustellen, dass Schwefelsäure bei einigen kritischen Metallen ein zu geringes Ausbringen erzielt.

Auch die Kombination von Laugemitteln wurde untersucht. In diesem Fall wurden Schwefelsäure und Essigsäure gestuft kombiniert. Gewünschtes Ziel war eine Überführung der Bleipartikel in die essigsäure Lösung, nach folgender Umwandlung



bevor eine Passivierung durch die unter Einfluss von Schwefelsäure einsetzende Umwandlung von Bleiverbindungen in Blei^{II}-Sulfat an der Partikeloberfläche stattfindet. Die Optimierungsversuche der schwefelsauren-Laugung nach vorangehender Laugung mit Essigsäure erwiesen sich allerdings als nicht praktikabel. Die Versuche der Schwefel-/Essigsäurelaugung zeigten ein 3 % höheres Ausbringen an Kupfer. Mit Hinblick auf die Komplexität eines so geführten Lauge-Verfahrens bei einer technischen Umsetzung unter Berücksichtigung des zusätzlichen Nutzens wurde hier auf eine Weiterführung der Untersuchungen verzichtet. Zusammenfassend ist das Laugesystem mit Salzsäure unter ökonomischen und technischen Gesichtspunkten der beste Kompromiss zwischen hoher Metallabreicherung und geringer Verfahrenskomplexität.

In Versuchsreihen im Anschluss an die Festlegung des Lauge-Systems wurde festgestellt und validiert, dass die Laugung über die Dauer von 120 Minuten hinaus keine nennenswerten Steigerungen des Ausbringens mehr erkennen ließen (vgl. Abbildung 22).

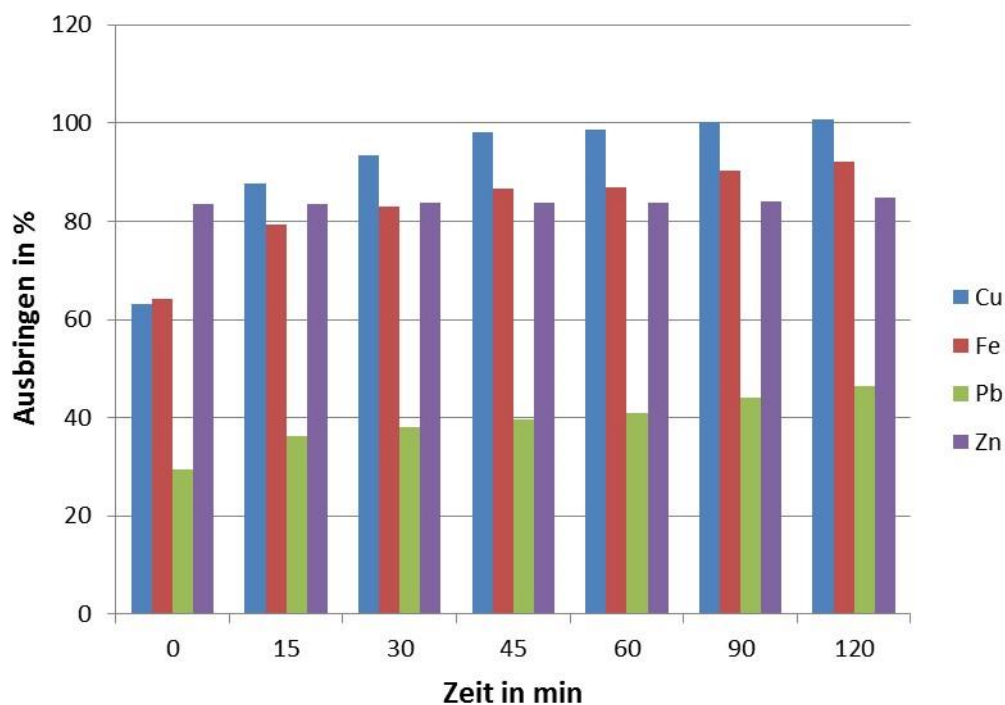


Abbildung 22: Darstellung des Lauge-Ausbringens über die Zeit in einem salzsauren System für ausgesuchte Metalle (1 molare Salzsäure, 90 °C, gerührte Laugung, H₂O₂-Beteiligung)

Weitere Optimierungsversuche zeigten (s. Tabelle 11), dass eine salzsaure Laugung (1 molar) bei Einsatz von H₂O₂ als Oxidationshilfsmittel über 60 Minuten ausreicht, um die notwendigen Mengen metallischer Bestandteile in Lösung zu bringen.

Tabelle 11: Ausbringen ausgewählter Metalle unter Einsatz 1 molarer HCl in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur

Aus- bringen Zeit	Kupfer / %		Eisen / %		Blei / %		Zink / %	
	60 °C	90 °C	60 °C	90 °C	60 °C	90 °C	60 °C	90 °C
0 min	43	63	44	64	20	29	59	83
15 min	68	88	59	79	30	36	67	83
30 min	72	93	63	83	31	38	70	84
45 min	80	98	77	87	36	40	71	84
60 min	91	99	79	87	35	41	71	84
90 min	92	100	78	90	37	44	76	84
120 min	94	100	78	92	38	47	78	85

Um die Steigerung der Ausbringen zu optimieren, wurde überprüft, ob geänderte Zugabekriterien für H_2O_2 zu einer besseren Lösung des Materials führen würde. Dazu wurde eine Lösung von 0,5 mol HCl auf den pH 1,1 eingestellt und gehalten, während die Menge und zeitliche Abfolge an H_2O_2 variierte. In den Versuchen wurde bei einem Teil der Proben 10 ml H_2O_2 vollständig zu Beginn der Versuche dazugegeben, bei anderen wurden kontinuierlich alle 5 min 1 ml H_2O_2 hinzugegeben. Eine Versuchsreihe wurde als reine HCL-Laugung, ohne die Zugabe von H_2O_2 als Vergleichsmessung durchgeführt.

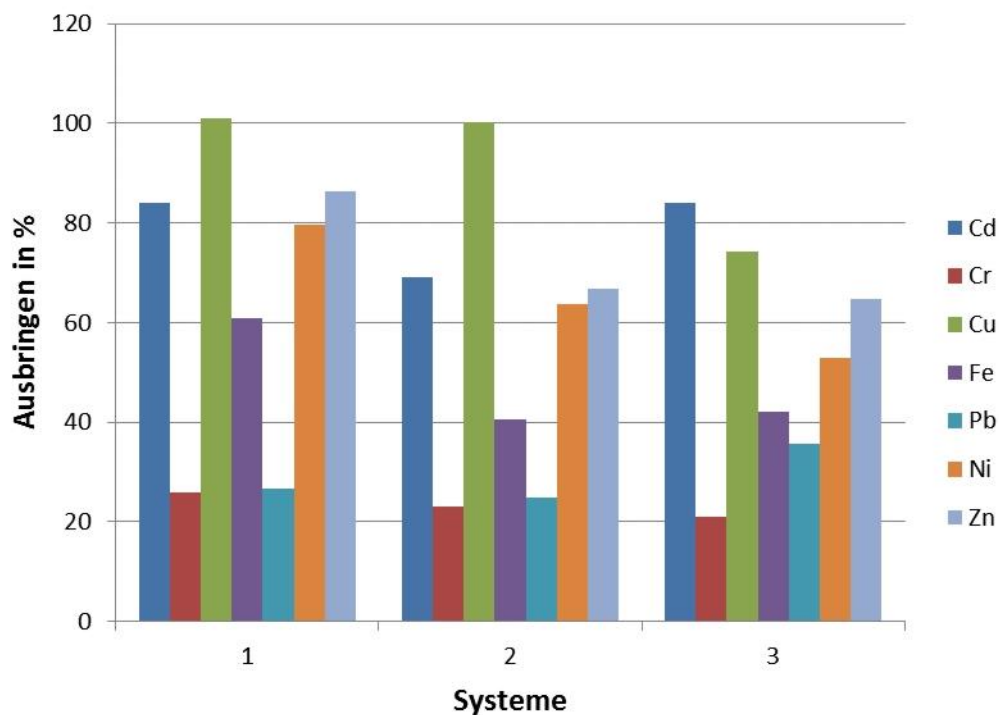


Abbildung 23: Ausbringen unterschiedlicher Laugesysteme auf Grundlage 0,5 molarer Salzsäure. HCl ohne Zusatz von H_2O_2 (1), HCl mit Zugabe 1 ml H_2O_2 alle 5 Minuten (2) und einmaliger Zugabe von 10 ml H_2O_2 (3) zu Beginn der Laugung (für 120 Minuten)

Es ist aus Abbildung 23 ersichtlich, dass besonders für die Menge des gelösten Bleis die einmalige Zugabe von H_2O_2 einen deutlichen Ausbringenzugewinn hervorruft, wohingegen das Ausbringen an Eisen zurückgeht. Da Blei hinsichtlich der Umweltschädlichkeit und damit der Relevanz für die Zulassung eines möglichen Baustoffes von größter Bedeutung ist, wurde entschieden, dass es prioritär ist, möglichst viel Blei zu lösen, auch wenn dies bedeutet, Eisenanteile im Laugerückstand zu belassen. Da die einmalige Zugabe von H_2O_2 zu Beginn der Versuche die besten Ausbringen hinsichtlich der fokussierten Metalle liefert, ist von einer deutlichen Verbesserung der Laugungs-Ausbringen auch bei höheren Säurekonzentrationen aber verkürzter Laugungszeit auszugehen.

Für den geplanten Einsatz des durch die Laugung von metallischen Störstoffen befreiten silikatischen Stoffstroms gelten als Einsatzkriterien die Grenzwerte der Mitteilung 20 der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA M 20) sowohl für die Feststoffe (siehe hierzu Tabelle 12) als auch für die Eluat-Werte (siehe hierzu Tabelle 13).

Wurden zu Projekt-Beginn noch die Anforderungswerte für eingeschränkten Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen (Z2-Werte) für Boden als Kriterium definiert, haben sich im Rahmen der Arbeit neuere Zielanforderungen durch den Einsatz zur Baustoffherstellung ergeben.

Neben den „Grenzwerten für Bauschutt vor der Aufbereitung“ der LAGA M 20 von 1997 wurden durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung auch die Grenzwerte für den Abfalleinsatz von Produkten aus der Überarbeitung der LAGA M20 von 2004 überprüft.

Tabelle 12: Schwermetallgehalte im Laugerückstand des Shredder-Sandes im Vergleich zu verschiedenen Grenzwerten der LAGA M 20³, alle Angaben in mg/kg

Bestandteil	Shredder-Sand (Königswasseraufschluss)	Grenzwert 1 ⁴	Grenzwert 2 ⁵	Grenzwert 3 ⁶
As / mg/kg	16	150	50	150
Pb / mg/kg	635	1000	300	700
Cd / mg/kg	6	10	3	10
Cr _{ges} / mg/kg	280	600	200	600
Cu / mg/kg	81	600	200	400
Ni / mg/kg	126	600	200	500
Zn / mg/kg	229	1500	500	1500

Es ist ersichtlich, dass nach dem einstufigen Laugeprozess die Grenzwerte der neusten gesetzlichen Anforderung („Grenzwert 3“ für Feststoffe nach EP der LAGA M20, August

³ erweiterte Darstellung nach einem Analysenprotokoll für Shreddersand der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Auftrags-Nr. : 7.4-C03-12, Dr. K. Rübner

⁴ Grenzwerte für Feststoffe nach LAGA M 20, November 1997 für Boden zum eingeschränkten Einbau mit definierten technischen Sicherheitsmaßnahmen (Z2-Wert)

⁵ Grenzwert für Feststoffe nach LAGA M 20, November 1997 für Bauschutt vor der Aufbereitung

⁶ Grenzwert für Feststoffe nach EP der LAGA M 20, August 2004 für den Abfalleinsatz in Produkten

2004 für den Abfalleinsatz in Produkten) in jedem geforderten Punkt unterschritten werden. Für die Feststoffgehalte der mineralischen Fraktionen wird also die Einsetzbarkeit der Fraktion als gegeben erachtet. Die Grenzwerte 3 werden nach Einschätzung der BAM dabei für den geplanten Verwertungseinsatz die größte Relevanz haben, da sie aus der neueren Revision der LAGA M 20 stammen.

Zusätzlich zu den Feststoffgehalten schreibt das entsprechende Regelwerk (LAGA M20) auch eine Untersuchung des Eluationsverhaltens und Grenzwerte für die im Eluat vorliegenden Stoffe und Eigenschaften vor (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Schwermetall- und Salzgehalte im wässrigen Eluat des Laugerückstands aus Shredder-Sand (Schütteleluat, Wasser/Feststoff = 10 : 1 l/kg)⁷

Eigenschaft/Bestandteil	Shredder-Sand	Grenzwert 1 ⁸	Grenzwert 2 ⁹
pH	4,50	7-12,5	7-12,5
Leitfähigkeit / $\mu\text{S}/\text{cm}$	114,4	3000	3000
Cl^- / mg/l	15,4	150	100
SO_4^{2-} / mg/l	14,3	600	600
As / $\mu\text{g}/\text{l}$	5,35	50	
Pb / $\mu\text{g}/\text{l}$	8,14	100	
Cd / $\mu\text{g}/\text{l}$	3,30	5	
Cr_{ges} / $\mu\text{g}/\text{l}$	1,31	100	60
Cu / $\mu\text{g}/\text{l}$	6,46	200	100
Ni / $\mu\text{g}/\text{l}$	14,79	100	70
Zn / $\mu\text{g}/\text{l}$	256,10	400	200

Auch für das Eluatverhalten zeigt sich, dass mit Ausnahme des pH-Wertes und des Zink-Gehalts alle Werte (gemäß „Grenzwert 2“ für Eluate nach EP der LAGA M 20, August 2004 für RC-Baustoff, aufbereiteter Bauschutt RC-3) deutlich unterschritten werden. In

⁷ nach einem Analysenprotokoll für Shreddersand der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Auftrags-Nr. : 7.4-C03-12, Dr. K. Rübner

⁸ Grenzwerte für Eluate nach LAGA M 20, November 1997 für Bauschutt vor der Aufbereitung bzw. Zuordnungsklasse Z2 für RC-Baustoffe (auch nach DIN 4226-100)

⁹ Grenzwerte für Eluate nach EP der LAGA M 20, August 2004 für RC-Baustoff, aufbereiteter Bauschutt RC-3

nachfolgend durchgeführten Untersuchungen konnte geklärt werden, dass durch die nachträgliche Reinigung der mineralischen Fraktion mit heißem Wasser auch pH-Wert, Zinkgehalt und Bleigehalt für das Eluationsverhalten in geeignete Bereiche gebracht werden können.

Das mineralische Konzentrat (Laugerückstand) aus der Laugung ist in Abbildung 24 dargestellt:



Abbildung 24: mineralisches Konzentrat (nach der Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)

5.1.5.2 Extraktionsversuche zur Rückgewinnung metallischer Anteile aus der Laugelösung

Im Rahmen der Entwicklung und Optimierung der Abtrennungs- und Fällprozesse wurden umfangreiche Untersuchungen zur Rückgewinnung der gelösten Metalle aus den zuvor hergestellten Lösungen durchgeführt.

Zur Extraktion im Rahmen dieser Fragestellung wurden die Varianten der Solvent- (Flüssig-Flüssig-) Extraktion oder der Fällungsextraktion eingehender untersucht.

Bei der Solventextraktion werden mittels eines geeigneten zweiten Lösungsmittels, das mit dem ersten Lösemittel nicht mischbar ist und sich auf Grund anderer Dichte von diesem absetzt, gezielt eine oder mehrere Komponenten aus der ursprünglichen Lösung entfernt. Da aus einer wässrigen sauren Lösung extrahiert werden soll, werden eine oder mehrere organische Phase(n) eingesetzt, die in der Regel durch Ionenaustausch Metall-Komplexe bilden, die in der organischen Phase angereichert werden.

Als Beispiel sei die Lösung von Kupfer in salzsaurer Lösung mithilfe des Lösungsmittels Aliquat-336 ($\text{C}_{25}\text{H}_{54}\text{ClN}$) angeführt. Mischt man eine kupferbeladene Salzsäure (HCl) mit Aliquat-336 liefert das Aliquat Chloridionen und bindet das Metall als Amin nach der Form:



Die Säure kann so von gelösten Metallionen abgereichert und wieder eingesetzt werden.

In Versuchen zur Extraktion in fluiden Systemen wurde aufgezeigt, dass es möglich ist, die in Lösung gebrachten Metalle durch flüssig-flüssig-extraktive Verfahren (Solvent-Extraktion) zurückzugewinnen. Dazu wurden Untersuchungen mit verschiedenen Extraktionsmitteln durchgeführt. Es wurde im Rahmen der Auswahl geeigneter Extraktionsmittel zunächst eine Eingrenzung der Systeme auf zwei Extraktionsmittel erarbeitet: Kelex 100 und Aliquat-336.

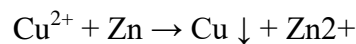
Die mit dem Extraktionsmittel Kelex 100 erzielten Ergebnisse (maximal mögliche Extraktion) bei idealem pH-Wert (zwischen -1 und 2) belaufen sich durchschnittlich auf 93 % Cadmium, 15 % Chrom, 97 % Kupfer, 71 % Eisen, 59 % Blei, 12 % Nickel und 82 % Zink. Dabei konnte die Beobachtung gemacht werden, dass das Extraktionsmittel schon in einer einzigen Extraktionsstufe im Mittel Cadmium zu 67 %, Kupfer zu 60 %, Eisen zu 58 % Blei zu 36 % und Zink zu 52 % aus der Laugelösung entfernt. Die Versuche mit dem Extraktionsmittel Aliquat 336 zeigten leicht bessere Ergebnisse für bestimmte Metalle in einer einzelnen Stufe. So konnte Zink und Eisen zu annähernd 99 % und Blei zu fast 77 % entfernt werden. Kupfer wurde zu etwa 67 % entfernt. In den Versuchen zum Strippen der Metalle aus den organischen Lösemitteln wurde jedoch festgestellt, dass die Abtrennrate aus dem Extraktionsmittel Kelex 100 sehr gering ist.

Für eine Solvent-Extraktion der hier vorliegenden Art stellt sich daher Aliquat-336 als geeigneteres Mittel dar.

Die Rückgewinnung der Metalle aus der Extraktionsmittelphase stellt allerdings einen aufwändigen verfahrenstechnischen Prozess dar. Für die sortenreine Rückgewinnung der

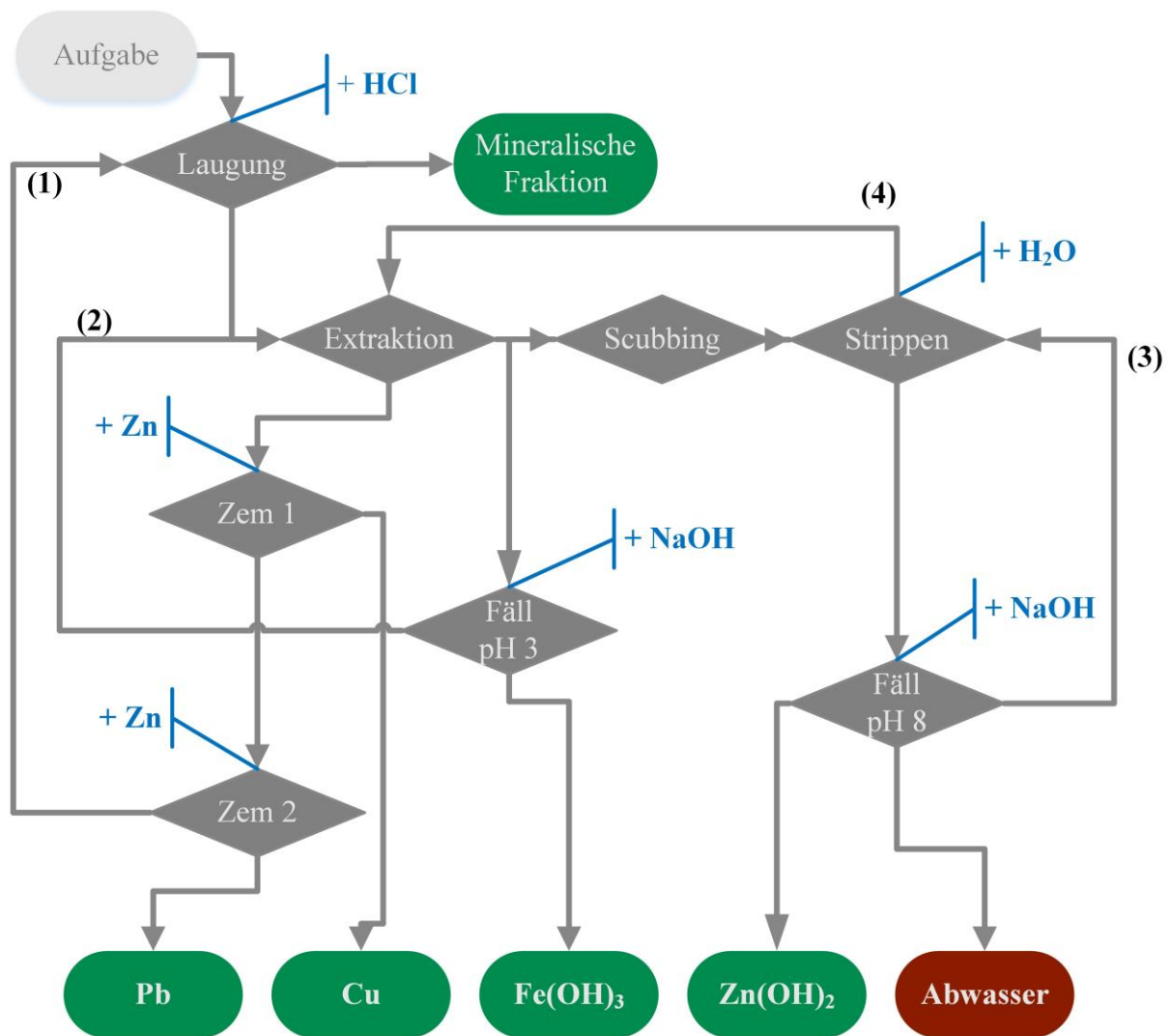
wichtigsten Metalle (Blei, Zink, Eisen und Kupfer) wurde für die vorliegende Arbeit im Rahmen einer eigens vergebenen Masterarbeit [3] ein Verfahren entwickelt, das in einem siebenstufigen Prozess einen Großteil der im Extraktionsmittel Aliquat-336 gebundenen Metalle zurückführen kann (siehe Abbildung 25).

Für diesen Prozess ist es notwendig, dass die Laugelösung mit einer hohen Konzentration an Chloridionen versehen wird. In den Versuchen wurden in 1 Mol/l Salzsäure zusätzlich 4 Mol/l Natriumchlorid eingebracht. Die Laugebedingungen unterschieden sich ansonsten nicht von denen, der zuvor gemachten Untersuchungen. Aus der Laugelösung wurden Zink (Zn) und Eisen (Fe) als ZnCl_4^{2-} und FeCl_6^{3-} mit Aliquat-336 mehrstufig extrahiert. Dies dient unter anderem dazu, den Zink-Verbrauch in den nachfolgenden Schritten zu senken. Nach diesem Schritt kann mittels Fällungsreaktion mit einem Zinkpulver-Katalysator Kupfer und Blei nach folgender Formel zementiert werden.



Aus dem Extraktionsmittel kann in einer anschließenden Scrubbing-Stufe und nach der Fällung mit NaOH (Neutralisationsfällung) bei pH 3 der Fe-Anteil in Form von $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ausgefällt werden. Mittels Strippen mit Wasser und einer erneuten pH-Wert-Erhöhung auf pH 8 kann aus dem Stripping-Wasser schließlich auch $\text{Zn}(\text{OH})_2$ abgetrennt werden.

Durch diese Vorgehensweise könnte die Salzsäure größtenteils im Kreislauf gehalten werden, da sie als regenerierte Säure wieder in die Laigestufe gegeben werden kann. Die vorhandenen Zink-Rückstände sind für die Lösungsreaktion zunächst unerheblich. Auch das Extraktionsmittel kann so regeneriert und wieder eingesetzt werden. Den vollständigen Verfahrensweg skizziert Abbildung 25 (nach [3]).



- | | |
|--------------------------|-----------------------------------|
| (1): 1 HCl + 4 NaCl (Zn) | Zem 1: Zementationsstufe 1 |
| (2): NaCl (Zn, Fe) | Zem 2: Zementationsstufe 2 |
| (3): NaCl (Zn) | Fäll pH 3: Fällungsstufe bei pH 3 |
| (4): Aliquat 336 | Fäll pH 8: Fällungsstufe bei pH 8 |

Abbildung 25: Verfahrensfließbild zur vollständigen Rückgewinnung von Metallen aus der Laugelösung nach [3], die Zugabe von Stoffen ist in blau gekennzeichnet (z.B.: + NaOH)

Da eine Rückgewinnung der einzelnen Metalle durch das beschriebene Solvent-Extraktions-Verfahren unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu diesem Zeitpunkt nicht darstellbar ist, wurden Möglichkeiten untersucht, um mit geringem Aufwand die in Lösung befindlichen Metalle zurück zu gewinnen. Als Alternative zu der beschriebenen Solvent-Extraktion wurden daher Möglichkeiten zur reinen Fällungsextraktion untersucht. Bei der Fällungsextraktion wird das Lösemittel (z.B. durch Fällungsmittel) so modifiziert, dass die zu gewinnende Fraktion als unlöslicher Niederschlag in Form von Flocken oder Kristallen ausfällt. Im Falle der Neutralisationsfällung werden vornehmlich Metall-Hydroxide gebildet, die durch das

gleichzeitige steigen des pH-Werts nicht mehr löslich sind. Neben einer Fällung mit Natriumsulfid (Na_2S) wurde auch eine Neutralisationsfällung mit Natronlauge (NaOH) durchgeführt. Bei den Analysen der Natriumsulfid-Fällung konnte gezeigt werden, dass es in einer einzigen Fällungsstufe möglich ist, von den in der Laugelösung befindlichen Metallen annähernd 100 % Kupfer, 47 % Blei, 35 % Zink, 33 % Cadmium, 30 % Chrom, 27 % Eisen und 25 % Nickel auszufällen. Weitere Versuche wurden aber aufgrund der Entstehung von Schwefelwasserstoff in dieser Reaktion und den hohen Ausbringenverlusten nicht unternommen. Eine Kombination des Einsatzes von Natriumsulfid nach vorangehender Anhebung des pH-Wertes durch NaOH wurde auf Grund der nachfolgend beschriebenen Fällergebnisse mit reinem NaOH nicht weiter untersucht.

Die Fällungen mit NaOH wurden in einer ähnlichen Versuchsdurchführung untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass durch die Anhebung des pH-Wertes der Laugelösung auf pH 7 jeweils nahezu 100 % der Metalle Aluminium, Chrom, Eisen und Zink ausgefällt werden konnten. Blei wurde zu 95 % und Kupfer wurde zu 85 % zurückgewonnen. Eine Steigerung des pH-Wertes auf 10 konnte den Anteil zurückgewonnenen Kupfers auf 96 % steigern, den für Blei auf 98 %. Für die weiteren Untersuchungen zur Verfahrensführung stellte daher die Neutralisationsfällung mittels NaOH die bestmögliche Variante der Metallrückgewinnung aus der Laugelösung dar. Allerdings werden dabei sowohl die eingesetzte Salzsäure als auch die Natronlauge neutralisiert, so dass sie nicht mehr regeneriert werden können. Somit entsteht an dieser Stelle ein größerer Bedarf an Chemikalien, da eine Kreislaufführung nicht möglich ist sowie als Nebenprodukt Salzlösung in großen Quantitäten.

Diese Salzlösung stellt einen zu entsorgenden Rückstand dar. Je nach Standort der Anlage könnten dabei unterschiedliche Behandlungsrouten zum Tragen kommen. Zum einen könnte, bei einem Standort an dem die Nutzung von Abwärme möglich ist, die Salzlösung durch Verdampfung in metallhaltiges Salz überführt werden, welches im Anschluss weiter verarbeitet werden kann - möglich wäre z.B. die Zuführung des metallhaltigen Salzes in die Aufbereitung von Rafinationssalzen. Zum anderen wäre auch eine Mitbehandlung in den spezifischen Abwasser-Aufbereitungsanlagen der metallverarbeitenden Industrie denkbar, wenn diese vor Ort verfügbar sind.

Eine direkte Einleitung der Salzlösung in einen küstennahen Vorfluter wird auf Grund der noch vorhandenen Restmetalle nicht möglich sein, Tabelle 14 stellt die Metallfracht der Lösung bei unterschiedlichen pH-Werten während des Neutralisationsprozesses dar:

Tabelle 14: Metallgehalte in der Laugelösung während der Neutralisationsfällung in Abhängigkeit vom pH-Wert

Element	Dimension	Ausgangsmaterial pH < 0	pH 2,8	pH 7	pH 10
Al	mg/l	1161,55	293,24	< 10	< 10
Cl	g/l	37,60	31,54	33,86	30,34
Cr	mg/l	92,37	3,72	< 1	< 1
Cu	mg/l	233,81	171,12	33,31	< 10
Fe	mg/l	5399,33	91,99	< 10	< 10
Pb	mg/l	308,31	274,57	14,25	< 5
Si	mg/l	1219,11	98,88	< 20	< 20
Zn	mg/l	1605,33	1389,31	< 10	< 10

Nach der Fällung der Metalle aus der Lösung kann eine Fest-Flüssigtrennung erfolgen (z.B. durch Filterung). Die rückgewinnbare Fraktion aus den Fällungsschlämmen ist in Abbildung 26 zu sehen:



Abbildung 26: Abfiltrierte Fällungsschlämme aus der Neutralisationsfällung (nach der Trocknung; Stereomikroskop, trocken, 8fache Vergrößerung)

Alternativ muss eine Verfahrensrouten betrachtet werden, die keine Abreicherung der mineralischen Fraktion vornimmt. Dabei würde dann nach dem Schritt der Absiebung ein

mineralischer Rückstand verbleiben, der durch seine Gehalte an Metallen keiner weiteren stofflichen Verwertung zugeführt werden könnte und so einem anderen Einsatz zugeführt werden müsste. Eine Einsetzbarkeit als Versatzmaterial ist nach dem aktuellen Stand der Grenzwerte für Stoffe zum Versatz nicht möglich [38].

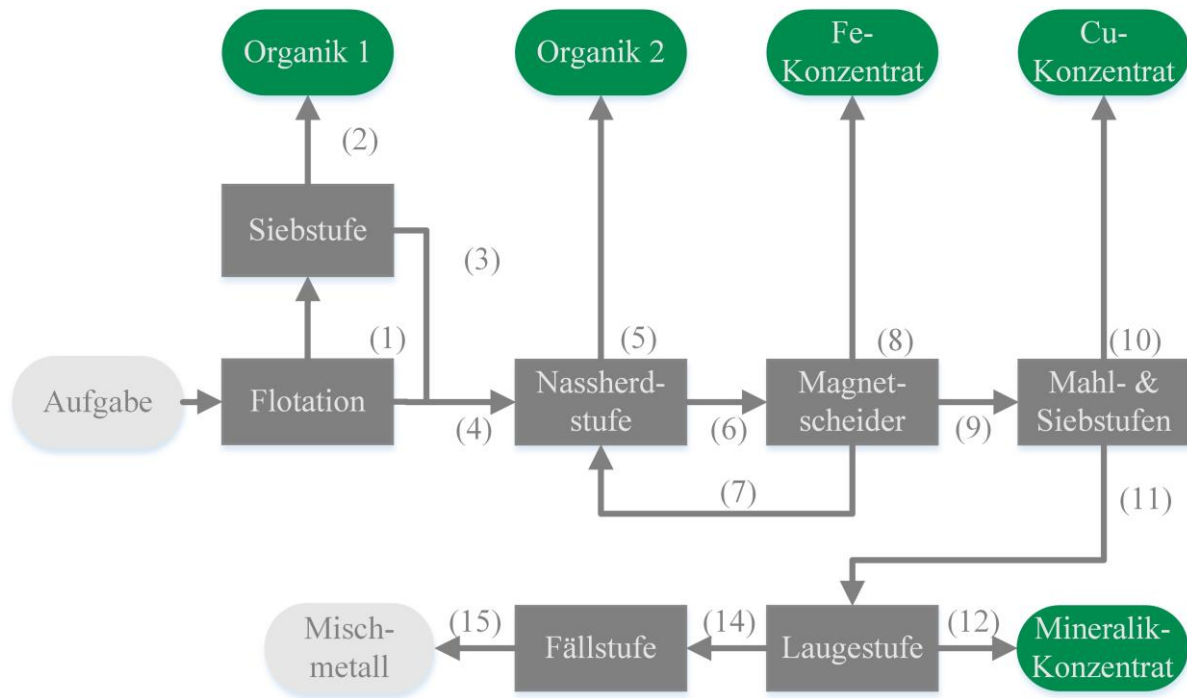
Dadurch würden auf der einen Seite die Verfahrensschritte der Laugung und der Fällung entfallen, was das Verfahren in der Umsetzung deutlich vereinfachen würde und nicht das Problem der notwendigen Behandlung großer Mengen Salzlösung aufwerfen würde. Auf der anderen Seite würden allerdings auch die Fraktionen „mineralisches Konzentrat“ und „Mischmetallfraktion“ nicht entstehen, was sich auf die Recyclingquoten auswirken würde. Die Mengen der so nicht erzeugten Fraktionen wird in Kapitel 7 näher beleuchtet.

Aus den Untersuchungen zur Verfahrensführung haben sich demnach zwei Verfahrensvarianten ergeben, die je nach ökologischem und ökonomischem Aufwand und den zur Verfügung stehenden Rahmenbedingungen bei der Umsetzung erneut geprüft werden sollten.

5.1.6 Gesamtdarstellung des entwickelten Verfahrens zur Aufbereitung von Shredder-Sand

Zusammenfassend wurde ein Verfahren entwickelt, das in sieben Trennstufen Shredder-Sande in seine wertstoffhaltigen Fraktionen auftrennen kann. Den vollständigen und an die Vorgaben aller Abnehmer angepassten Verfahrensweg zur Aufbereitung von Shredder-Sanden stellt Abbildung 27 in vereinfachter Form dar. Die Nummerierung im Folgenden entspricht der Nummerierung in der Abbildung: Nach der Benetzung mit Wasser erfolgt in der ersten Stufe die Abtrennung einer organikreichen Textilfraktion durch Flotation. Um die Verschleppung und einhergehenden Fehlaustrag feinkörniger Metall- und Mineralikanteile zu verhindern, wird die Flotatfraktion (1) im Anschluss auf einem Sieb weiter aufgetrennt. Der Siebunterlauf (3), der den metall- und mineralikreichen Anteil darstellt, wird zurück in den Hauptprozessweg gegeben. Entlang des Hauptprozesses erfolgt im nächsten Schritt eine Behandlung auf einem Nassherd, wobei eine organikreiche Leichtfraktion (5) abgetrennt wird. Die Schwerfraktion (6) folgt weiter dem Verfahrensweg und wird im nächsten Schritt durch einen nassen Mittelfeldmagnetscheider in eine eisenreiche (8) und eine eisenarme (9) Fraktion aufgetrennt. Da die Magnetscheidestufe in Rougher-, Cleaner- und Scavenger-Stufe eingeteilt wird, entstehen in der Cleaner- und Scavenger-Stufe Middlings. Durch den hohen Organikgehalt dieser Teilstoffströme werden diese zurück auf den Nassherd geführt (7). Die

eisenabgereicherte Fraktion wird durch Mahlung und Siebung behandelt, wobei nach zwei Mahl- und Siebstufen zwei Kupferkonzentrate $> 100 \mu\text{m}$ (10) und eine mineralische Fraktion $< 100 \mu\text{m}$ (11) entstehen. Zur Entfernung letzter vorhandener feinstkörniger Metalle wird das Material salzsauer gelaut. Der Laugungsrückstand (12) kann nach einer Waschung als Mineralik-Konzentrat eingesetzt werden. Die beladene Säure (14) wird in einer Fällstufe mit Natronlauge behandelt. Der Fällungsrückstand (15) kann abfiltriert werden und enthält die zuvor ausgelaugten Mischmetalle.



- (1): Flotat-Fraktion 10 %
- (2): Fraktion $> 250 \mu\text{m}$ 37 %
- (3): Fraktion $< 250 \mu\text{m}$ 63 %
- (4): Flotationsrückstände 90 %
- (5): Leichtgut 18 %
- (6): Schwergut 82 %
- (7): Middlings aus Magnetstufe 16 %

- (8): Magnetische Fraktion 29 %
- (9): Unmagnetische Fraktion 55 %
- (10): Fraktion $> 100 \mu\text{m}$ 2 %
- (11): Fraktion $< 100 \mu\text{m}$ 98 %
- (12): Fester Laugerückstand 66 %
- (13): Beladene Salzsäure
- (14): Fällungsschlämme

Abbildung 27: Vereinfachter vollständiger Verfahrensweg für die Aufbereitung von Shredder-Sanden $< 1 \text{ mm}$ aus den Rückständen des Volkswagen-SiCon-Verfahrens zur Rückgewinnung einer Kupfer-, einer Eisen-, einer Fällungsschlamm- und einer Baustoff-Vorkonzentrat-Fraktion. Die prozentuale Angabe der Legende bezieht sich auf den Anteil der Produkte aus der Verfahrensstufe, wenn die Aufgabe in die Stufe 100 % ist.

5.2 Anwendung des Verfahrensansatzes auf Shredder-Sand-Proben unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung

Zur Absicherung der Verfahrensstabilität bei unterschiedlichen Inputzusammensetzungen wurden verschiedene Probematerialien an Shredder-Sand unterschiedlicher Zusammensetzung durch den beschriebenen Verfahrensweg behandelt. Es zeigte sich dabei durchgängig, dass das Verfahren für die zwei möglichen Extrempunkte des Shredder-Sandes aus 100 % ELV und Shredder-Sand aus 100 % NELV ebenso einsetzbar ist, wie für unterschiedliche Mischungen aus beiden Stoffströmen. Inputbedingt stellt sich die anteilige Zusammensetzung der Output-Stoffströme zwar abweichend dar, gesicherte Aussagen über finale Zusammensetzungen und Ausbringen dieser Varianten können aber erst getroffen werden, wenn größere Mengen kontinuierlich durch eine Anlage im Pilotmaßstab behandelt werden. Die Anwendbarkeit des entwickelten Verfahrens auf Shredder-Sande unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzung ist gegeben.

5.3 Erweiterungen der Untersuchungen auf Shredder-Sandfraktionen > 1 mm

Da Shredder-Sande in den untersuchten Vorbehandlungsstufen in Korngrößen ≤ 5 mm vorliegen, verbleibt nach Abtrennung des Anteils mit Korngrößen ≤ 1 mm ein nicht behandelter Rückstand mit Korngrößen zwischen 1 und 5 mm. In weiterführenden Versuchsreihen wurde die bisher entwickelte Verfahrenssystematik auf Shredder-Sande mit einer Korngröße > 1 mm adaptiert:

Eine Siebmetall-Analyse (s. Tabelle 15) ergab, dass die Metalle in dem genannten Korngrößen-Bereich weitgehend gleichmäßig über alle Kornklassen der Siebreihen von 5 mm bis 0,5 mm (R10-Siebreihe) verteilt sind. Die Anteile der Korngrößen < 1 mm entstehen dabei durch Desagglomeration und Ablösevorgänge des ansonsten grobkörnigeren Materials in einer Nasssiebung. Durch die gleichmäßige Verteilung über alle Kornklassen kann keine gezielte Abtrennung einer bestimmten Kornklasse zur Wertstoff- oder Mineralstoffrückgewinnung aus den Sanden > 1 mm genutzt werden.

Tabelle 15: Siebmetall-Analyse einer Shredder-Sand-Probe mit Korngrößen zwischen 1 und 5 mm

Proben	GV / M-%	C / M-%	Cu / M-%	Fe / M-%	Pb / M-%	Si / M-%	Zn / M-%
0,50mm	26,08	-	1,09	21,70	0,28	9,87	1,86
1,00mm	22,63	11,93	1,14	19,55	0,42	12,38	1,56
1,25mm	24,5	13,71	1,31	18,50	0,37	12,59	1,23
1,35mm	24,92	13,24	1,15	17,51	0,46	13,34	1,18
1,60mm	30,79	15,85	0,79	15,12	0,32	10,50	0,90
2,00mm	23,08	16,17	1,32	26,12	0,14	9,29	1,32
2,50mm	25,33	17,46	1,81	26,63	0,11	8,52	0,61
3,15mm	29,09	19,93	1,75	21,50	0,14	7,66	0,68
4,00mm	43,81	30,70	1,19	16,62	0,09	6,33	0,41
5,00mm	42,68	29,16	0,48	26,56	0,11	4,34	0,62

Um die Möglichkeiten eines trocken-mechanischen Aufbereitungsschritts vor der ersten nass-mechanischen Trennstufe zu prüfen, wurde zunächst die Abtrennung der faserigen Textilbestandteile für Shredder-Sande < 1 mm aufgegriffen (vgl. Abbildung 9, Seite 41).

Analog zu den gemachten und zuvor beschriebenen Untersuchungen (s. Ausführungen zu Abbildung 8) für Shredder-Sande wurde das gröbere Material durch die einzelnen Verfahrensstufen behandelt und so die Fraktionen Prallmühlen-Schwergut (rund 42 M-% der Input-Menge) und Prallmühlen-Leichtgut (rund 58 M-% der Input-Menge) erzeugt. Das Prallmühlen-Leichtgut wurde in einem nächsten Behandlungsschritt ebenfalls auf ein trockenes Taumelsieb aufgegeben, woraus die Fraktionen des Sieb-Oberlaufs und des Sieb-Durchgangs erzeugt wurden.

Die Analysen der Prallmühlen-Schwergut-Fraktionen zeigten, dass in diesen Fraktionen etwa 70 % des Kupferinhalts der Aufgabe sowie 61 % des Zinkinhalts der Aufgabe gesammelt werden können.

Es wurde weiterhin festgestellt, dass rund 20 % des Inputs als gesammelter Sieb-Oberlauf aus der Leichtgut-Fraktion mit einer Korngröße > 1 mm ausgetragen wird. Dieser Sieb-Oberlauf enthält Gehalte von 5 % Eisen und 4 % Silizium sowie Kupfer, Zink und Blei in den Größenordnungen von jeweils 0,1-0,7 % und sollte durch die optisch bestimmte

Materialzusammensetzung im Vergleich zu den Materialien der organischen Fraktion < 1 mm einen Brennwert haben, der mindestens dieser Fraktion entspricht und sollte so einer energetischen Verwertung zugeführt werden können.

Die noch verbliebenen Inhalte an Metallen und mineralischen Materialien werden in den Siebunterlauf ausgetragen. Der Siebunterlauf (< 1 mm) ähnelt in seiner chemischen Zusammensetzung (s. Tabelle 15 < 1 mm) und in dem optischen Erscheinungsbild (Stereomikroskopische Untersuchung) dem Material aus dem Hauptprozess. Es liegt so die Vermutung nahe, dass er den Shredder-Sanden des Hauptprozesses zugeschlagen werden könnte.

Die Umsetzung der Aufbereitung von Shredder-Sanden mit Korngrößen zwischen 1 und 5 mm und die tatsächlichen Mengen und Gehalte hängen stark von zukünftigen Entwicklungen in der Shredder-Sand-Rückstandsaufbereitung ab. Die Entwicklung verlässlicher Aufbereitungsschritte wäre im Umfang ähnlich intensiv, wie die hier vorgestellten Arbeiten zu Shredder-Sanden < 1 mm. Es wurde daher auf die weitere Optimierung und Verfeinerung der Aufbereitung der Shredder-Sande 1 mm bis 5 mm verzichtet, insbesondere, da theoretisch das Potential besteht, diese in alternative Verfahrenswege (etwa dem GfM-Prozess, s. o.) einzuschleusen.

Grundsätzlich werden aber mögliche Optimierungspotentiale durch den Einsatz neuer trocken-mechanischer Behandlungsschritte gesehen. Durch die Erfahrungen mit dem Material werden Behandlungsschritte mittels Mittelfeld-Trockenmagnetscheidung und Barrieren-Wirbelstromscheider als möglicherweise gangbare Verfahren gesehen.

5.4 Peripherie-Prozesse und Ermittlung prozesstechnischer Parameter

Da das Gebiet der Shredder-Sand-Aufbereitung im hier untersuchten Kornband < 1 mm bislang noch nie für industrielle Umsetzungen konzipiert wurde, mussten neben notwendigen Verfahrensstufen auch die notwendigen peripheren Prozesse in der Verfahrensentwicklung berücksichtigt werden.

Die einzigen Schritte, die nicht explizit im Rahmen des Verfahrens entwickelt und nicht in den bereits zuvor beschriebenen Verfahrensschritten berücksichtigt werden, sind die Förderprozesse der Trübe und die Fest-Flüssig-Trennung, die im Rahmen der Entwässerung des Materials benötigt werden. In beiden Fällen kann auf marktübliche Techniken und Aggregate zurückgegriffen werden. Hier wurden im Vorfeld Gespräche mit einschlägigen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus (z.B. Firma Leiblein) geführt, die positiv

ausfielen. Auch durch die Firma AWAS können entsprechende Techniken zur Verfügung gestellt werden.

Nach Abschluss der Untersuchungen zur Verfahrensführung wurden die noch nicht erfassten Prozessparameter identifiziert. Um einen vollständigen Ablauf darstellen zu können und die Maschinendimensionierung aufeinander abzustimmen, wurden umfassende Massenbilanzen durchgeführt. Es wurden zum einen die Massenströme der Feststoffe analysiert und zum anderen die Volumenströme der Flüssigkeiten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden die Ausgangsdaten für die in Kapitel 6.1 aufgeführten Massenbilanzen von SICON und ermöglichen so eine erste wirtschaftliche Abschätzung für die Umsetzung des Verfahrens. Die vollständige Massenbilanz der relativen Massenströme bezogen auf die vorhergehenden Prozessstufen sowie die zu- und abführbaren Fluidströme (Luft und Wasser) wie sie in den Untersuchungen ermittelt wurden, sind in getrennten Flussdiagrammen erfasst worden.

Abbildung 28 zeigt das Flussdiagramm für Fluide, insbesondere die Wassermengen und die Abwasser-Ströme sowie die in den Versuchen bestimmten Restfeuchten der Fraktionen bei batchweisem Betrieb der Anlage. Entsprechend der Vorgehensweisen der im Technikum eingesetzten Aufbereitungsaggregate wurden für die vollständige Bilanzierung nach jeder Trennstufe eine Fest-Flüssig-Trennung und eine Restfeuchte-Bestimmung des Materials durchgeführt. Das getrocknete Material wurde, soweit nicht für weitere Analysen eingesetzt, für den nächsten Schritt erneut attritioniert und behandelt. Notwendige Filterstufen für die Trocknung abgehender Fraktion und die damit erreichbaren Restfeuchtegehalte sind ebenfalls eingezeichnet und wurden aus den Ergebnissen der Untersuchung erstellt.

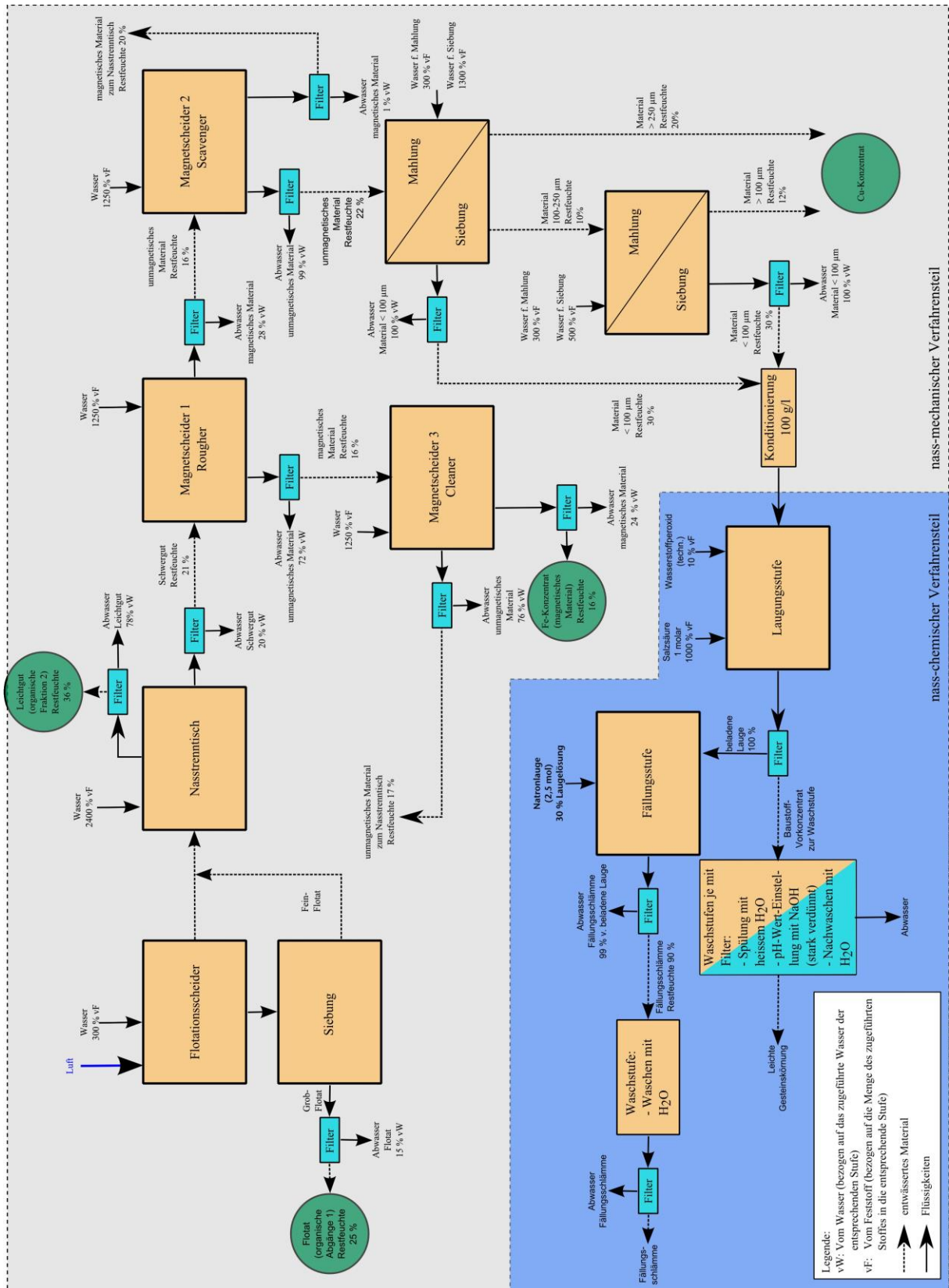


Abbildung 28: Stoffflüsse der fluiden Prozessströme. Die Wasser-Input-Menge in die Stufe wird relativ zum zugeführten Feststoff angegeben (bezeichnet als „vF“ [„Vom Feststoff“]). Die Aufteilung nach der Stufe erfolgt relativ zur Wasserinput-Menge (bezeichnet als „vW“ [„Vom Wasserinput“]).

5.5 Verwertungstests an Aufbereitungsprodukten

Für die Betrachtung der Einsetzbarkeit der erzeugten Konzentrate wurden, iterativ zu Kapitel 5.1 (Verfahrensentwicklung), die Einsatzparameter möglicher Konzentrate bei weiterverarbeitenden Betrieben abgefragt. Ziel war es, unterschiedliche Einsatzoptionen bilateral zu besprechen um die Einsatzmöglichkeiten der Konzentrate abschätzen zu können.

Bei allen Absprachen und Einsatzidentifizierungen muss bedacht werden, dass die Konzentrate vorgestellt wurden, wie sie im batchweise gefahrenen Betrieb aus den Untersuchungen zur Verfahrensführung anfielen. Im Rahmen einer industriellen Umsetzung muss eine erneute Bewertung stattfinden, um die mit dem Scale-Up üblichen Veränderungen (z.B. durch Änderungen der eingesetzten Maschinen oder durch Kreislaufführung von Middlings) in den erzeugten Konzentraten identifizieren zu können. Die durch die Gespräche und Tests von und mit potentiellen Abnehmern ermittelten Preise wurden der ökonomischen Betrachtung in Kapitel 6.3 zugrunde gelegt.

5.5.1 Kupferlizen

Mit Hinblick auf die Einsetzbarkeit der Kupferlizen in einer Kupferhütte wurden die aus dem Prozess entstehenden Kupfer-Fractionen zur Einsatz-Untersuchung bei verschiedenen Verwertern vorgestellt. Mit der Aurubis AG Lünen konnten schließlich Einsatzparameter des Materials diskutiert werden. Es wurde festgestellt, dass grundsätzlich beide Fractionen einsetzbar sind. Eine Einschränkung wurde aufgrund des hohen Glühverlustes in der Fraction 100-250 μm gemacht, die sich aber hauptsächlich im Marktwert des Materials und dadurch im Preis niederschlägt. Aufgrund der Preis-Volatilität im Metall-Markt (Ausgangspunkt der Preisverhandlungen waren immer Preise des London Metal Exchange (LME)) können aber über die finale Preisgestaltung nur Näherungsangaben gemacht werden.

5.5.2 Eisen-Konzentrat

Der Anteil des Eisenkonzentrates in der Summe der verwertbaren Konzentrate übersteigt die ursprünglich prognostizierte Menge. Für diese Fraction konnte ein potentieller Abnehmer aus der Eisenmetallurgie (Herstellung von Gusseisenprodukten) gefunden werden (DK Roheisen). Untersuchungen mit dem Ziel, das Material für andere Einsatzzwecke zu nutzen, etwa als Reduktionsmittel und Schlackenbildner in der Sekundär-Kupfer-Metallurgie oder als Eisen-Träger in der Zementproduktion, erwiesen sich als weniger zielführend.

Ähnlich der Kupfer-Fraktion wurde auch die Eisen-Fraktion nach den, zum Zeitpunkt der Preisabfrage geltenden Preisen für Eisenkonzentrate, bewertet. Einhergehend mit der Marktsituation verändern sich durch die sich verändernde Angebotslage ebenfalls die zulässigen maximalen Gehalte möglicher Störstoffe. Aufgrund dieser Tatsache und der sich zum Zeitpunkt der Abfrage ungünstig darstellenden Marktlage kann das Material zwar eingesetzt aber nicht positiv bepreist werden. Auf diesen Umstand wird die Sensitivitäts-Analyse in Kapitel 6.3.2.4 näher eingehen.

5.5.3 Mineralstoff-Fraktion

Vorausgesetzt, dass eine chemische Behandlung der mineralischen Fraktion $< 100 \mu\text{m}$ im Anschluss an die Abtrennung der Kupfer-Litzen stattfindet, lassen sich die mineralischen, überwiegend silikatischen und oxidischen Bestandteile durch den vorgeschlagenen Verfahrensweg in eine Mineralik-Fraktion überführen, die die chemischen Spezifikationen erfüllt, welche für eine Nutzung zur Erzeugung von RC-Baustoffen erforderlich sind. In Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar konnten durch Verknüpfung mit Entwicklungen im Rahmen des dort bearbeiteten r^2 -Projektes „Aufbaukörnung“ (BMBF Verbundprojekt, Förderkennzeichen: 033R015) Voraussetzungen entwickelt werden, um die Mineralik-Fraktion zur Aufbaukörnung und Blähgranulatherstellung nutzbar zu machen.

Für den Bereich der mineralischen Fraktion musste, wie in Kapitel 5.5.3 bereits angemerkt, zunächst die Frage der zugehörigen Grenzwerte geklärt werden. Durch die langjährige Erfahrung der BAM Berlin konnten entsprechende Grenzwerte definiert werden. Statt der ursprünglich im Antrag definierten Grenzwerte nach LAGA M20 Z2 für Boden werden Grenzwerte für Feststoffe nach LAGA M 20, November 1997 für Bauschutt vor der Aufbereitung und Grenzwerte für Feststoffe nach EP der LAGA M 20, August 2004 für den Abfalleinsatz in Produkten als relevant erachtet. Trotz der Änderungen der Grenzwerte kann durch den entwickelten Verfahrensweg sichergestellt werden, dass diese unterschritten werden und das Material grundsätzlich eingesetzt werden kann.

Untersuchungen am F.A. Finger-Institut der Bauhaus-Universität Weimar konnten zeigen, dass das mineralische Material in der Form, wie es durch den Prozess mit Korngrößen $\leq 100 \mu\text{m}$ erzeugt wird, in seiner Zusammensetzung den Materialien ähnelt, die als „Blähtone“ bezeichnet werden. In Abbildung 29 ist eine typische Zusammensetzung der mineralischen Fraktion aus Shredder-Sanden im Dreistoffsystem Al_2O_3 , SiO_2 und Flussmittel aufgetragen. Im Vergleich dazu sind die Bereiche blähfähiger Stoffe nach Riley [4] und

Wilson [5] (eliptoide Areale) und die Zusammensetzungen handelsüblicher Blähtone (BT) sowie die im Forschungsprojekt der BU Weimar primär anvisierten Stoffe aus gebrochenen Mauerwerksrückständen (MW) markiert.

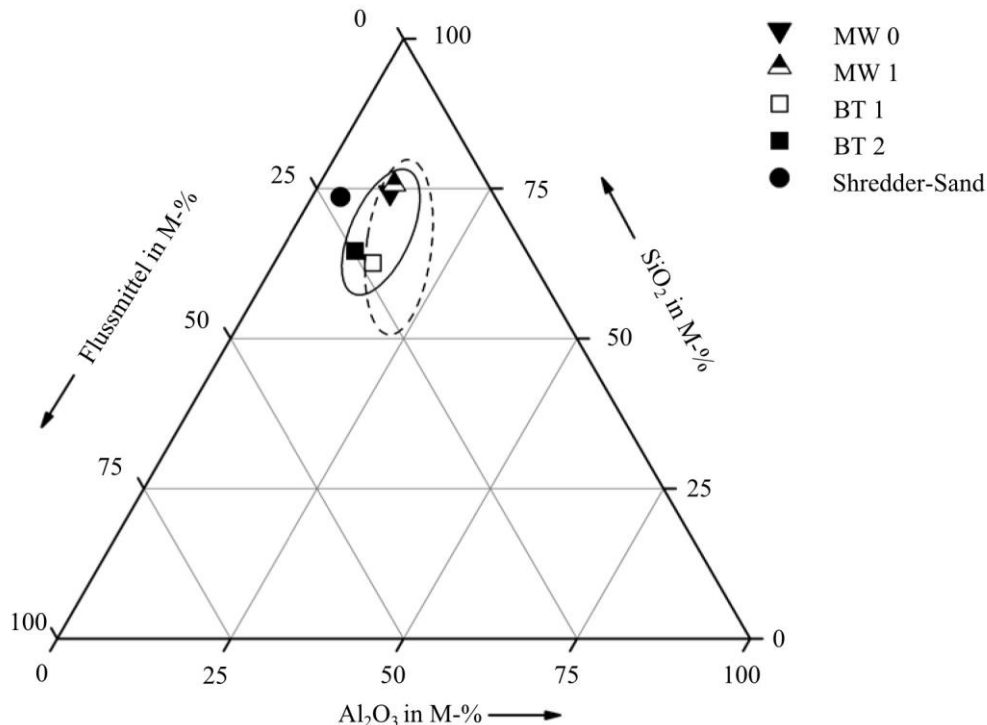


Abbildung 29: Chemische Zusammensetzung der mineralischen Fraktion des Shredder-Sands im Vergleich zu der von Mauerwerkbruch (MW) und kommerziellem Blähton (BT) sowie zu den markierten Bereichen für blähfähige Tonrohstoffe nach Riley [4] (gestrichelte Linie) und Wilson [5] (durchgängige Linie) im Dreistoffsystem Al_2O_3 - SiO_2 -Flussmittel¹⁰

Die abschließenden Untersuchungen konnten belegen, dass mittels Granulierung und nachgeschalteter thermischer Blähprozesse Leichtgranulate hergestellt werden können, die in dieser Form auch als leichte Gesteinskörnung eingesetzt werden können. Durch die spezifische Zusammensetzung der entsprechenden Fraktion aus Shredder-Sand konnte festgestellt werden, dass der Erweichungsbeginn der aus der Shredder-Sand-Fraktion hergestellten Granulate um etwa 100 K unterhalb der Temperatur von Blähtonen, bei 1200 °C, liegt. Des Weiteren hat sich ergeben, dass auch die Brennversuche bei, im Vergleich zu Blähtonen, vergleichsweise geringen Temperaturen um 1050 °C erfolgen kann. Die abschließende Untersuchung des Röntgendiffraktogramms der Brennprodukte lässt keine abschließende Aussage zur Anwesenheit des Blähmittels SiC und damit zum SiC-Verbrauch während des Prozesses zu.

¹⁰ vereinfachte Darstellung, Analysenprotokoll für Shreddersand der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Auftrags-Nr. : 7.4-C03-12, Dr. K. Rübner

Darüber hinaus wurden für die leichten Gesteinskörnungen (siehe Abbildung 30) aus Shredder-Sanden weiterführende Eignungsuntersuchungen durchgeführt. Als mögliches Einsatzfeld der leichten Gesteinskörnung wurde der Einsatz in Betonen und Mörteln identifiziert und daraus notwendige Materialcharakterisierungen wie Festigkeit und Rohdichte abgeleitet und überprüft. Es wurden Festigkeitsmessungen an 20 Granulaten unterschiedlicher Korngrößen (2/4 mm und 4/8 mm) mittels Tablettenprüfgerät durchgeführt. Zusätzlich wurde die Rohdichte mithilfe eines Feststoffpyknometers bestimmt. Beide Untersuchungen belegen, dass die leichten Gesteinskörnungen aus Shredder-Sanden bezüglich Kornfestigkeit und Rohdichte zum Einsatz als Gesteinskörnung in Betonen und Mörteln geeignet sind [39].

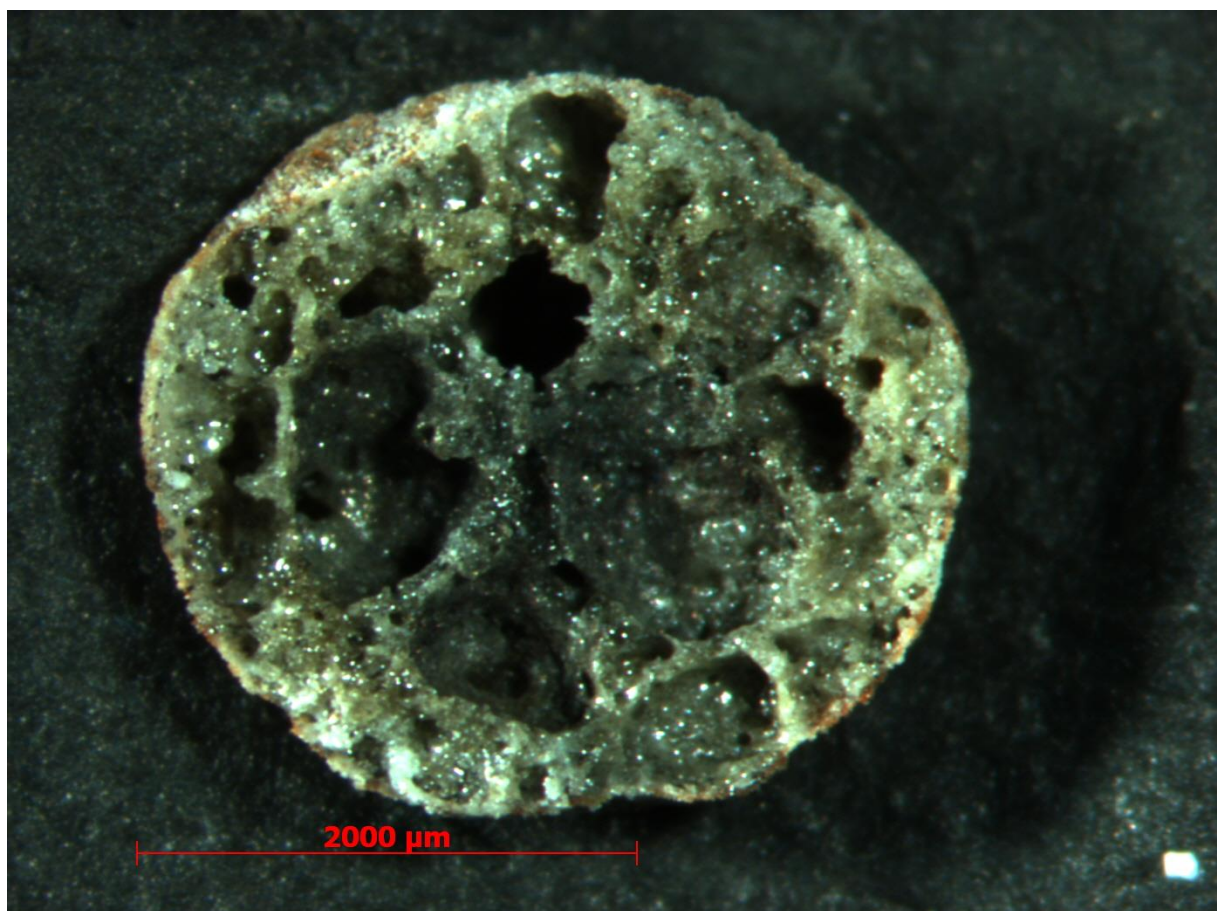


Abbildung 30: Leichtgranulat 2/4 mm aus der mineralischen Fraktion des Shredder-Sands

Eine abschließende Aussage zur Einsetzbarkeit in Beton- und Mörtelverbindungen kann allerdings noch nicht gemacht werden. Dazu muss der eingesetzte Sand in ausreichend großen Mengen aus einer Pilotanlage in den notwendigen Quantitäten verarbeitet und die Granulate in einer Beton- oder Mörtelmatrix auf ihr chemisches Verbundverhalten untersucht werden.

Da auch die Arbeiten der Bauhausuniversität Weimer zur Aufbaukörnung und thermischen Porosierung von Recycling Materialien noch im Forschungsstadium sind, kann zunächst von

einer Einsetzbarkeit ausgegangen werden. Aufgrund der im Vergleich zu dem sonst für diesen Prozess eingesetzten Mauerwerksbruch geringen Mengen und nicht vollständig durchgeführten Untersuchungen zum Einsatz der aus Shredder-Sand erzeugten leichten Gesteinskörnungen konnte allerdings noch keine Bepreisung erfolgen.

Sollte eine chemische Behandlung aus ökologischen, ökonomischen oder technischen Aspekten nicht in Frage kommen, wird die nicht weiter aufbereitete mineralische Fraktion $< 100 \mu\text{m}$ deponiert werden müssen.

5.5.4 NE-Metallfällungsschlämme

Für den Fall, dass eine chemische Behandlung in den Prozess integriert würde, fällt die im Folgenden beschriebene Fraktion der NE-Fällungsschlämme an. Bei einer Umsetzung des Verfahrens nur über die mechanischen Aufbereitungsschritte, fällt diese Fraktion nicht an.

Durch die Veränderungen im Ausgangsmaterial und das sich anders als ursprünglich vermutet darstellende Sortier- und Klassierverhalten einzelner Teilstoffströme ist die Rückgewinnung der Metalle aus der mineralisch basierten Fraktion $< 100 \mu\text{m}$ einer sehr hohen Komplexität unterworfen.

Nachdem im Rahmen der Untersuchungen gezeigt wurde, dass die Rückgewinnung einzelner Metallfraktionen aus Fällungsschlämmen, die in den Markt rückführbar sind, mit hohem verfahrenstechnischem Aufwand verbunden ist und daher in einer direkten Kopplung an den Aufbereitungsprozess (Stand-Alone) nicht durchführbar ist, wurde ein vereinfachtes Verfahren entwickelt. Durch Lauge- und Fällungsstufe kann eine metallische Fraktion erzeugt werden, die neben Blei und Zink auch Eisen, Kupfer, Aluminium und andere Metalle enthält. Typische Zusammensetzungen für die wichtigsten Elemente und den Glühverlust zeigt Tabelle 16. Der ausgewiesene Glühverlust der Proben rührt dabei nicht von der Verbrennung organischer Bestandteile der Proben her, was unmittelbar durch den geringen Kohlenstoffgehalt von ca. 0,5 % des Probenmaterials untermauert wird. Dieser Wert ist auf die ausgetriebenen Hydroxid- und Kristallwasser-Anteile zurückzuführen. Versuche zur Restfeuchte-Bestimmung haben dies im Anschluss bestätigt. Bei Probe 3 wurde aufgrund dieses Phänomens auf die Messung von Glühverlust und Kohlenstoff verzichtet. Die hohen Gehalte an Chlor sind dem aus der Neutralisation entstehenden Salz(en) geschuldet.

Tabelle 16: Beispielhafte Zusammensetzung dreier Proben aus Fällungsschlämmen („-“, bedeutet nicht analysiert)

Parameter	Probe 1	Probe 2	Probe 3
GV / M-%	29,32	24,43	-
Al / M-%	2,97	3,57	3,72
C / M-%	0,51	0,57	-
Cl / M-%	21,35	19,07	19,16
Cr / ppm	2.098	2479	2.818
Cu / ppm	3.952	4.230	4.292
Fe / M-%	14,07	17,36	17,8
Mg / M-%	0,68	0,86	0,85
Pb / ppm	8.368	9.956	10.650
Si / M-%	3,05	3,62	-
Zn / ppm	38.811	46.106	49.741

Für diese Fraktion wurden Verwertungswege gesucht. Durch die Heterogenität des Materials und die Vielzahl der vorhandenen Metalle wurde im Rahmen dieser Arbeit kein wirtschaftlich geeigneter Einsatzbereich gefunden (vgl. Anhang). Für die ökologische und auch die ökonomische Betrachtung wurde, wie in Kapitel 6.3 weiter erläutert, dieser Stoffstrom nicht betrachtet.

Durch aktuelle und geplante Entwicklungen im Bereich hydrometallurgischer Metallrückgewinnung wird allerdings durch die Recylex GmbH die Möglichkeit gesehen, die mineralisch-metallische Ausgangsmischung in einen eigenen hydrometallurgischen Prozess zu integrieren und die Metalle als Reinmetallkonzentrate zurückzugewinnen bei gleichzeitiger Rückgewinnung der Mineralikfraktion zum Einsatz als leichte Gesteinskörnung. Diese Integration in den hydrometallurgischen Prozess der Recylex hätte sowohl Auswirkungen auf die Ökobilanz (siehe Kapitel 6.3) als auch auf das Ergebnis der wirtschaftlichen Betrachtung (siehe Kapitel 6.4).

5.5.5 Restorganik

Für die organikreichen Restfraktionen ergaben die Untersuchungen, dass diese nach aktuellem Stand der Gesetzgebung und der Praxis mindestens zum Teil und ohne weitergehende Behandlung bei dem ermittelten durchschnittlichen Heizwert in einer Müllverbrennungsanlage mit Kraft-Wärme-Kopplung zur energetischen Verwertung genutzt werden können.

Nach den Erkenntnissen, die auch von der Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschlandland e.V. und der Ökobilanz gestützt werden, können diese organischen Fraktionen der Verbrennung in Müllheizkraftwerken zugeführt werden. Entsprechende Konditionierungsschritte im Brennstoffbunker der jeweiligen Anlage können dies gewährleisten. Basierend auf dieser Materialvorbereitung können punktuelle und temporäre Grenzwertüberschreitungen sowohl für Abgas als auch für Rückstände abgepuffert werden [40].

5.6 Zusammenfassung der Verfahrensuntersuchung

Durch die gemachten Untersuchungen konnte so ein ganzheitliches Verfahren entwickelt werden, um die Shredder-Sande mit Korngrößen < 1 mm weiter aufzubereiten. Eine Übersicht der Ergebnisse, sowohl, was einzelne Gehalte, als auch was den Anteil der einzelnen Fraktionen angeht, liefert Tabelle 17:

Tabelle 17: Gehalte ausgewählter Elemente und Glühverlust in den einzelnen Fraktionen sowie Anteil der Fraktionen an der Aufgabemenge

Fraktion	Gehalt / M.-%						Anteil an Aufgabe / M.-%
	GV	C	Cu	Fe	Si	Zn	
Organische Fraktion 1	36,39	19,77	0,21	14,15	9,07	2,29	3,81
Organische Fraktion 2	43,10	22,15	0,18	12,63	6,77	2,05	20,11
Eisen Konzentrat	7,10	2,87	0,29	51,14	3,38	1,27	26,21
Kupfer Konzentrat 1	0,00	6,91	55,32	4,16	2,37	1,90	0,76
Kupfer Konzentrat 2	25,99	16,69	8,12	3,49	14,75	1,90	0,57
Fällungsschlämme	26,88	0,54	0,40	17,00	3,34	4,00	15,21
Mineralik	5,02	2,92	0,01	6,11	34,52	0,04	33,33

Die Ausbringen der einzelnen Elemente in den entsprechenden Fraktionen zeigt Tabelle 18:

Tabelle 18: Ausbringen ausgewählter Elemente in den entsprechenden Fraktionen bezogen auf ein rechnerisch gemittelttes Ausgangsmaterial

Fraktion	Ausbringen / %				
	C	Cu	Fe	Si	Zn
Shredder-Sand < 1 mm	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Organische Fraktion 1	10,52	1,23	2,55	2,35	5,90
Organische Fraktion 2	62,19	5,56	12,01	9,26	27,87
Eisen Konzentrat	10,50	11,67	63,36	6,02	22,50
Kupfer Konzentrat 1	0,73	64,57	0,15	0,12	0,98
Kupfer Konzentrat 2	1,33	7,11	0,09	0,57	0,73
Fällungsschlämme	1,15	9,34	12,22	3,45	41,13
Mineralik	13,59	0,51	9,63	78,22	0,90

Nachdem nun die eigentliche Verfahrensuntersuchung abgeschlossen wurde, sollten die Ergebnisse der Arbeit in den Kontext einer gesamtheitlichen Bewertung einfließen. Die im Rahmen der Verfahrensentwicklung erzeugten Versuchsergebnisse und Resultate bilden in den sich anschließenden Kapiteln die Grundlage für die Betrachtungen. Diese Betrachtungen wurden in der Summe durch die Partner im Projekt durchgeführt und die Darstellung der so erzeugten Bewertungen soll der ganzheitlichen Betrachtung bei der möglichen Umsetzung des Verfahrens dienen. Die Anfragen und Exposees zu den Verwertungstests wurden durch Mitarbeiter der SiCon bearbeitet. Die Anlagenkonzeptionierung und die ökonomische Bewertung wurden durch Mitarbeiter der SiCon auf Grundlage und in Abstimmung mit den im Rahmen der Promotion ermittelten Ergebnissen erarbeitet. Die ökologische Bewertung mittels einer vergleichenden Ökobilanz wurde durch das Ökoinstitut ebenfalls auf Grundlage der zuvor im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeiteten Daten erstellt. Die Standortbestimmung für die optimalen Standorte einer möglichen Aufbereitungsanlage wurden durch die VW beigesteuert.

6 Anlagenkonzeptionierung sowie rechtliche, ökologische und ökonomische Wirkung

6.1 Anlagenkonzeptionierung

6.1.1 Szenarioentwicklung

Aus den sich ergebenden Auslegungsdaten der Massenströme im entwickelten Verfahren können Szenarien entwickelt werden, die nicht nur die Mengen, sondern auch die wirtschaftlichen Aspekte unter bestimmten Rahmenbedingungen einer Anlage zur Behandlung von Shredder-Sanden aus dem VW-SiCon-Verfahren berücksichtigen. Es wurde dabei im Vorfeld entschieden, zwei unterschiedliche Szenarien zu betrachten. Einem sollte eine zentrale Behandlungsanlage zu Grunde liegen, das andere sollte einem dezentralen Ansatz folgen und mehrere parallel arbeitender Aufbereitungsanlagen berücksichtigen. In beiden Szenarien wird von den in Deutschland anfallenden Shredder-Rückständen ausgegangen. Diese Menge ergibt die rechnerische Menge der zur Verfügung stehenden Shredder-Sande, wie sie nach Behandlung in VW-SiCon-Anlagen anfallen könnten.

Gemäß Angaben des Statistischen Bundesamtes wurden im Jahr 2009 von den Deutschen Shreddern rund 500.000 Tonnen Shredderleichtfraktion (SLF) erzeugt [41]. Bei der Anlagenauslegung wurde davon ausgegangen, dass die vom Statistischen Bundesamt ermittelten Mengen durchschnittliche Mengen sind und folglich in der Regel pro Jahr 500.000 Tonnen SLF in Deutschland verfügbar sind. Zur Erzeugung von Shredder-Sanden ist eine Absiebung bei zunächst 5 mm und anschließend bei 1 mm vorzunehmen. Unter der Voraussetzung, dass sich die Menge der SLF vollständig unter Zuhilfenahme des Volkswagen-SiCon-Prozesses aufbereiten ließe, konnten anfallende Mengen kalkuliert werden, wie sie in Tabelle 19 dargestellt sind (vertiefte Aufbereitung). Dem gegenüber gestellt sind die Mengen nach Aufbereitung der Shredderleichtfraktion ausschließlich durch Absiebung des Feinkorns und Metallabtrennung aus dem Siebüberlauf (geringe Aufbereitung).

Tabelle 19: Ausgangsdaten die der Ermittlung der zur Verfügung stehenden Input-Mengen und der daraus resultierenden Materialströme zugrunde liegen [SICON]

Art	Mengen	
	geringe Aufbereitung	vertiefte Aufbereitung
Menge an SLF in Deutschland ¹¹ / t/a:	ca. 500.000	
Menge an Shredder-Sanden (< 5 mm) / t/a:	ca. 60.000 ¹²	ca. 100.000 ¹³
Menge an Shredder-Sanden ¹⁴ / t/a:	ca. 35.000	ca. 60.000

Die Zahl von 60.000 t/a wird vor dem Hintergrund der weiteren Entwicklungen, insbesondere der verstärkten Bemühungen zur Metallrückgewinnung, als realistisches Szenario erachtet und wird daher in den weiteren Berechnungen als Grundlage genommen.

Bei einer Menge von 60.000 t an Shredder-Sanden pro Jahr werden die beiden folgenden Szenarien betrachtet: Szenario 1 berücksichtigt eine zentrale Anlage für ca. 60.000 t/a, in der alle anfallenden Shredder-Sande zentral behandelt werden können. Das Szenario 2 berücksichtigt drei dezentrale Anlagen, die jeweils ein Drittel des Shredder-Sandanfalls mit jeweils ca. 20.000 t/a verarbeiten können. Durch dieses Szenario 2 soll ein wesentlicher Beitrag zur Verringerung der Transportdistanzen geleistet werden. Aus den so definierten Szenarien ergeben sich für die Anlagen Betriebszeiten wie in Tabelle 20 angegeben. Es wurden dabei durch SICON unterschiedliche Schichtsysteme und die damit einhergehenden Produktionsmengen pro Stunde berücksichtigt.

¹¹ Anmerkung: SLF wird durch das Shreddern von Altfahrzeugen und weiteren Mischschrotten erzeugt. Der durchschnittliche Anteil von Altfahrzeugen am Shredder-Input beträgt gemäß Aussagen des BDSV 20-30%.

¹² Gemäß Sieberfahrungen der SICON GmbH beträgt der durchschnittlichen Anteil < 5 mm an SLF ca. 12%, geht man davon aus, dass die SLF nicht weiter aufbereitet wird.

¹³ Bei der weiteren mechanischen Aufbereitung der SLF (z.B. VW-SICON-Verfahren) fallen durch diverse Zerkleinerungsschritte weitere Mengen an Shredder-Sanden an. Diese liegen erfahrungsgemäß bei weiteren 8%.

¹⁴ Gemäß Untersuchungen des IFAD an Probemengen von SICON beträgt der Anteil ca. 61% der Gesamtmasse des Shredder-Sandes.

Tabelle 20: Produktionsmengen der einzelnen Szenarien und die Umrechnungen auf Produktionskapazitäten nach unterschiedlichen Schichtsystemen [SICON]

	Szenario 1	Szenario 2
Durchsatz pro Jahr pro Anlage:	60.000 t/a	20.000 t/a
Durchsatz pro Stunde 1-schichtig ¹⁵ :	36 t/h	12 t/h
Durchsatz pro Stunde 2-schichtig ¹⁶ :	18 t/h	6 t/h
Durchsatz pro Stunde 3-schichtig ¹⁷ :	12 t/h	4 t/h
Durchsatz pro Stunde 4-schichtig ¹⁸ :	8,5 t/h	3 t/h

Aus der Verfahrensführung und den zuvor bestimmten relativen Stoffstromaufteilungen können die Szenarien auch unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Arbeitsschichten abgebildet werden. Es wurden dazu Stoffstrommodelle erarbeitet, die für beide Szenarien unterschiedliche Arbeitsschichten berücksichtigen.

Im Hinblick auf eine Vereinheitlichung und Verringerung der darzustellenden Modelle wurden im Anschluss für folgende Referenzszenarien jeweils nur die dreischichtigen Modelle betrachtet. Daraus lassen sich auch Aussagen über die jährlich möglichen Produktionsmengen treffen (vollständige Umsetzung vorausgesetzt), die in Tabelle 21 zusammengefasst sind.

¹⁵ 8 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche, 50 Wochen pro Jahr, Verfügbarkeit 85% = 1.700 h/a

¹⁶ 16 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche, 50 Wochen pro Jahr, Verfügbarkeit 85% = 3.400 h/a

¹⁷ 24 Stunden pro Tag, 5 Tage pro Woche, 50 Wochen pro Jahr, Verfügbarkeit 85% = 5.100 h/a

¹⁸ 24 Stunden pro Tag, 7 Tage pro Woche, 50 Wochen pro Jahr, Verfügbarkeit 85% = 7.140 h/a

Tabelle 21: Mengen pro Anlage für die beiden unterschiedlichen Szenarien (Szenario 1: eine zentrale Anlage im Dreischichtbetrieb; Szenario 2: drei dezentrale Anlagen im Dreischichtbetrieb) bezogen auf ein Jahr nach [SICON]

	Baustoff-Vorkonzentrat	Cu-Konzentrat	Fällungsschlämme	Flotat (organische Abgänge 1)	Leichtgut (organische Abgänge 2)	Magnetisches Material
Anteil	30,05 M-%	1,24 M-%	15,21 M-%	10,31 M-%	18,75 M-%	24,44 M-%
Menge Szenario 1	18.029 t/a	745 t/a	9.127 t/a	6.186 t/a	11.252 t/a	14.661 t/a
Menge Szenario 2	6.010 t/a	248 t/a	3.042 t/a	2.062 t/a	3.751 t/a	4.887 t/a

6.1.2 Basic Design

Aufgrund der Aussagen zur Ökobilanz und einer ersten Abschätzung des Verhältnisses von Kosten zu Erlösen aus einer „Stand-Alone“-Variante der hydrometallurgischen Behandlungsstufe (über die Schritte Laugung und Fällung) wurde entschieden, die nass-chemischen Stufen des Verfahrens für das basic design und das process design nicht zu berücksichtigen. Dies ergibt sich hauptsächlich aus den geringen Mengen der Wertmetalle, die sich in einer Fraktion aus gefällten Mischmetallen finden. Die mengenmäßig größten Metallanteile, die pro Jahr in den Fällungsschlämmen anfallen könnten, sind abgeschätzt in Tabelle 22 dargestellt. Das Material würde dann als Fraktion < 100 µm im Anschluss an die Absiebung der kupferreichen Anteile einer Beseitigung zugeführt werden.

Tabelle 22: Auswahl rückgewinnbarer Metallfraktionen aus Fällungsschlämmen des Aufbereitungsverfahrens für Shredder-Sande in elementarer und oxidischer Form

Metall	Al	Cu	Fe	Pb	Zn
Anteil in Fällungsschlamm (durchschnittlich)	3 M-%	0,4 M-%	17 M-%	1 M-%	4 M-%
Jährliche Gesamtmenge als element. Metall	270 t	36 t	1.530 t	90 t	360 t
Jährliche Gesamtmenge als Oxid	510 t	45 t	2.188 t	97 t	448 t
Gerechnet als	Al ₂ O ₃	CuO	Fe ₂ O ₃	PbO	ZnO

Es wird ersichtlich, dass neben der Unvorteilhaftigkeit bezüglich der Ökobilanz, den hohen Investitionskosten für eine Säure/Lauge-Stufe und dem deutlichen Mehraufwand im Genehmigungsverfahren einer eigenen Anlage für die hydrometallurgische Metallrückgewinnung aus Shredder-Sanden zu geringe Mengen produzieren würde, um dadurch die Start-Investition und die Betriebskosten zu kompensieren. Bezüglich der wirtschaftlichen Abschätzung (s. Kapitel 6.3) wurde daher entschieden, die Betrachtungen zunächst auf die gesicherten und durch die Ökobilanz positiv bewerteten Verfahrensstufen zu beschränken. Die Integration der nass-chemischen Verfahrensstufen in die Prozesse der Recylex GmbH kann gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen. Da dafür aber noch keine sicheren Randbedingungen existieren, muss zunächst ein Interimsweg definiert werden.

Im Einzelnen wird im Bereich der Maschinenteknik die Laugestufe entfallen, wodurch in der Produktbilanz das Baustoffkonzentrat und die Fällungsschlämme nicht erzeugt werden, sondern eine mineralische Fraktion zum Einsatz im untertägigen Versatz erzeugt wird.

In der folgenden Planungsdokumentation wird der extrahierte Verfahrensteil durch grauen Hintergrund in Tabellen und Grafiken besonders kenntlich dargestellt.

Die für das Process Design vorläufig bestimmten Lieferanten wurden mit konkretem Probematerial versorgt und haben teilweise eigene Versuchsreihen zur Einsetzbarkeit der präferierten Maschinen durchgeführt. Der ausführliche Test der Eignung der

Magnetabscheidestufen wurde z.B. bei Fa. Eriez Magnetics durchgeführt (siehe Testbericht in Anhang).

Auch wurde die erarbeitete Massenbilanzstruktur auf Basis eines Szenarios von SICON kalkuliert und in eine Produktbilanz überführt. Die Maschinenauslegungsdaten der Hersteller konnten konkret herangezogen werden, um die Anzahl der notwendigen Maschinen pro Verfahrensschritt für zunächst einen zentralen Aufbereitungsprozess festzulegen:

Tabelle 23: Durchsatzbezogene Bestimmung der Anzahl der benötigten Maschinen unter Berücksichtigung der Materialmengen mit Rücklauf [SICON]

Verfahrensschritt	Ziel	Anteil / %	Durchsatz / t/a	Durchsatz / t/h	Anzahl	Durchsatz pro Maschine / t/h
Flotationsscheider		100	24.000	12,00	2,0	6,0
- Flotat (org. Fraktion 1)	Siebung 1	10	2.474			
- Unflotat	Nassherd	90	21.526			
Siebung 1		10	2.474	1,24	1	1,24
- Org. Fraktion 1	Produkt	37	916	0,46		
- Fein-Flotat	Nassherd	63	1.559	0,78		
Nassherd		111	26.667	13,33	6,0	2,22
- Leichtgut (org. Fraktion 2)	Produkt	18	4.827	2,41		
- Schwergut	Magnetabscheider 1	82	21.840	10,92		
Magnetabscheider 1 (Rougher)		91	21.840	13,92	1,0	10,92
- Unmagnetisches Material	Magnetabscheider 2	61	13.218	6,61		
- Magnetisches Material	Magnetabscheider 3	39	8.622	4,31		
Magnetabscheider 2 (Scavenger)		55	13.218	6,61	1,0	6,61
- Magnetisches Material	Nassherd	9	1249	0,62		
- Unmagnetisches Material	Mahlung	91	11.969	5,98		
Magnetabscheider 3 (Cleaner)		36	8.622	4,31	1,0	4,31
- Unmagnetisches Material	Nassherd	27	2.333	1,17		
- Magnetisches Material	Produkt	73	6.289	3,14		
Mahlung 1		50	11.969	5,98	1,0	5,98
- Unmagnetisches Material	Siebung 2	100	11.969	5,98		
Siebung 2		50	11.969	5,98	2,0	2,99
- Cu-Konzentrat 1	Produkt	2	182	0,09		
- 100 - 250 µm	Mahlung 2	12	1.422	0,71		
- Mineralische Fraktion 1	Produkt	87	10.365	5,18		
Mahlung 2		6	1.422	0,71	1,0	0,71
- 100-250 µm	Siebung 3	100	1422	0,71		
Siebung 3		6	1.422	0,71	1,0	0,71
- Mineralische Fraktion 2	Produkt	90	1.284	0,64		
- Cu-Konzentrat 2	Produkt	10	138	0,07		

Die Massenbilanz kann aufgrund der in der Arbeit ermittelten Stoffströme und einer iterativen Bestimmung (durch die SICON) der verschalteten Verfahrensführung nun auch annähernd bestimmt werden. Sie führt zu der in Tabelle 24 aufgeführten Produktbilanz. Diese ist, im Gegensatz zu Tabelle 21 um die Laugungsstufe und das daraus anfallende Material der Fällungsschlämme und der wieder einsetzbaren Baustoffe bereinigt. Damit ergeben sich höhere Mengen einer metallbeladenen mineralischen Fraktion. Die zweistufige Mahlung und Siebung ist dennoch notwendig, um die Kupferkonzentrate abtrennen zu können.

Tabelle 24: Massenbilanz mit zeitlichem Bezug nach [SICON]

Produkt	Anteil	Durchsatz	Durchsatz
Kupferkonzentrat I	0,76 %	182 t/a	0,09 t/h
Kupferkonzentrat II	0,57 %	138 t/a	0,07 t/h
Magnetisches Material	26,21 %	6.289 t/a	3,14 t/h
Mineralik Fraktion I	43,19 %	10.365 t/a	5,18 t/h
Mineralik-Fraktion II	5,35 %	1.284 t/a	0,64 t/h
Organische Fraktion I	3,81 %	916 t/a	0,46 t/h
Organische Fraktion II	20,11 %	4.827 t/a	2,41 t/h

Die Angaben, die aus Massen- und Produktbilanz erarbeitet wurden, sind Basis für die weiteren Arbeitsschritte (Layout, usw.).

Wie üblich muss im Rahmen einer solchen Verfahrensführung auch die Menge an Abwasser und die damit einhergehende Wasseraufbereitung untersucht werden. Basierend auf den Werten der Massenbilanz wurden die notwendigen Auslegungsdaten des Wasserverbrauchs in Zusammenarbeit mit der Fa. AWAS in Siegen bestimmt. Dabei wurden die Wasserdurchsätze der Maschinen bestimmt und auf die Anzahl der Maschinen hochgerechnet. Im nächsten Schritt erfolgte die Bestimmung, ob eine Fraktion als Trübe, also mit Wasser, an die nächste Stufe weitergegeben werden kann und der Brutto-Wasser-Input der folgenden Stufe so gesenkt werden kann. Daraus wurde eine Gesamtwassermenge im System bilanziert, wie aus Tabelle 25 für den mechanischen Teil der Anlage und in Tabelle 26 für den chemischen Teil der Anlage ersichtlich ist.

Tabelle 25: Bestimmung der notwendigen Wassermenge im mechanischen Verfahrensteil einer Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage [SICON]

Verfahrensschritt	Anzahl Maschinen	Durchsatz pro Maschine / m ³ /h	Wasserverbrauch / m ³		Wasserbehandlung	
			Brutto	Netto	nächste Stufe	Aufbereitung
Flotationsscheider	2	6,00	60	60		
- Flotat (org. Abgänge 1)				9		X
- Unflotat				45	X	
Siebung 1	1	1,24				
- Org. Abgänge						
- Fein-Flotat						
Nassherd	5	2,67	320	275		
- Leichtgut (org. Fraktion 2)				214		X
- Schwergut				55	X	
Trocknung	1	1,47				
- Ersatzbrennstoff						
Magnetabscheider 1 (Rougher)	1	10,92	137	82		
- Unmagnetisches Material				59	X	
- Magnetisches Material				23		
Magnetabscheider 2 (Scavenger)	1	6,61	83	24		
- Magnetisches Material				0,24		X
- Unmagnetisches Material				24	X	
Magnetabscheider 3 (Cleaner)	1	4,31	54	31		
- Unmagnetisches Material				24		X
- Magnetisches Material				8		X
Mahlung	1	5,98	18	0		
- Unmagnetisches Material				18	X	
Siebung 3	2	2,99	78	60		
- Kupfer-Konzentrat						
- 100 - 250 µm				0		
- < 100 µm				60		X
Mahlung	1	0,71	2	2		
- 100-250 µm				2	X	
Siebung 4	1	0,71	4	1		
- < 100 µm				1		X
- Kupfer-Konzentrat						

Tabelle 26: Bestimmung der notwendigen Wassermenge im nass-chemischen Verfahrensteil einer Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage und Summe für die Gesamtanlage [SICON] in Anlehnung an Tabelle 25

Verfahrensschritt	Anzahl Maschinen	Durchsatz pro Maschine / m ³ /h	Wasserverbrauch / m ³		Wasserbehandlung	
			Brutto	Netto	nächste Stufe	Auf-berei-tung
Laugungsstufe	1	5,82				
- Baustoff-Vorkonzentrat						
- Beladene Lauge						
Fällungsstufe	1	1,96				
- Fällungsschlämme						
Summe 535						

Um zu bestimmen, welche Wasseraufbereitung erfolgen muss, wurde zunächst eine Analyse der Wasserbelastung nach den einzelnen Verfahrensschritten im Labor bestimmt. Tabelle 27 stellt die dabei gemessenen Werte nach Anfallort dar:

Tabelle 27: Gehalte ausgesuchter Elemente in den Abwässern bestimmter Verfahrensstufen zur Abschätzung der notwendigen Abwasserbehandlungsschritte

Element	Dimension	Flotat	Unflotat	SG 1	Nasstrenntisch LG	Nassmagnet / magn. Fraktion Aufgabemat.: SG von NTT	Nassmagnet (M1)/ n.m. Fraktion Aufgabemat.: SG vom NTT	Nassmahlung des n.m. Konzentrats	Nachsiebung der Mittelfraktion aus 1. Siebung
Cd	mg/L	< 0,005	0,023	< 0,005	< 0,005	0,006	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Cr	mg/L	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,00687
Cu	mg/L	0,43	0,14	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,13	< 0,1
Hg	mg/L	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Ni	mg/L	0,14	0,12	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
P	mg/L	0,14	0,11	0,23	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Pb	mg/L	< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,025	0,079	0,027	< 0,025	< 0,025

Neben der Bestimmung der im Wasser anfallenden Metallgehalte wurde auch die Restfeuchte der einzelnen Fraktionen nach Filterung (Druckluft-Filter-Presse) bestimmt, um so den Austrag an Wasser aus dem gesamten System zu quantifizieren (Tabelle 28). Auf Grundlage dieser Werte kann nun der minimale Frischwasserbedarf ermittelt werden: er liegt in der Abschätzung der Wassermenge, die durch die Restfeuchte der Produkte dem Prozess entzogen wird. Diese abgeführte Menge Wasser muss dem System konsequenterweise erneut zugeführt werden.

Tabelle 28: Berechnung der jährlichen Wasserverluste durch Ausschleusung von Wasser als Restfeuchte der Fraktionen

Fraktion	Anfall trocken / t/a	Restfeuchte / M-%	Rechnerische zuzügliche Wassermenge / t
Organische Fraktion 1	916	25	305
Organische Fraktion 2	4827	35	2599
Eisen-Konzentrat	6289	15	1110
Kupfer-Konzentrat 1	182	20	46
Kupfer-Konzentrat 2	138	15	24
Mineralik	11649	30	4992
Durchschnittlich über alle Fraktionen	24001	27	9077

Durch die Ausschleusung der angegebenen Wassermengen als Restfeuchte und die Zuführung unbelasteten Wassers kann als Folge eine Anreicherung an Schad- und Störstoffen im Prozesswasser begrenzt werden. Lediglich ein zentraler Abscheider für Schwebstoffe und gröbere Partikel müsste vorgesehen werden. So könnte davon ausgegangen werden, dass nahezu 100 % des Prozesswassers im Kreislauf gefahren werden kann und eine Einleitung von Abwässern nicht notwendig wird. Die Praxis in anderen Bereichen nass-mechanischer Aufbereitungsverfahren z.B. mittels Nass-Trenntisch lassen vermuten, dass durch die entsprechenden Restfeuchtegehalte (durchschnittlich ca. 27 M-%) eine solche Vorgehensweise auch hier angewendet werden kann. Die sich nach Tabelle 28 ergebende Wassermenge beträgt (unter der Vereinfachung, dass 1 m³ gerundet 1 t entspricht) rund

0,4 m³/t Shredder-Sand. Dieser Wasserverbrauch, der in den Versuchen nicht minimiert werden konnte, wird als mindestens notwendig und daher als Minimal-Szenario betrachtet.

Mit der Fa. AWAS wurde darüber hinaus eine ähnliche Aufbereitung der Prozesswässer besprochen, allerdings wurde die Kreislaufrückführung für Prozesswasser mit maximal möglichen Verschmutzungen durch die im Shredder-Sand enthaltenen Stoffe auf 90 % abgeschätzt. Dem zugrunde liegt, dass Wasser wegen seiner Belastung durch gelöste metallische Anteile in größeren Quantitäten aus dem System ausgeschleust werden muss. Die ausgeschleuste Wassermenge muss mit Frischwasser ausgeglichen werden. Das von der AWAS aufgezeigte Szenario führt zu einem Wasserbedarf von etwa 54 m³/t, welches für die Vorliegenden Arbeiten aufgrund der Höhe des Frischwasserverbrauchs als Maximal-Szenario betrachtet werden soll.

Zusammenfassend sind die Einsparpotentiale im Bereich des Abwassers etwa durch den Faktor 100 gekennzeichnet (siehe Tabelle 29).

Tabelle 29: Übersicht der möglichen Wasserverbräuche für ein Maximal-Szenario und ein Minimal-Szenario

Szenario	Wasserverbrauch / m ³ /t ¹⁹
Maximal-Szenario (90 % Kreislauf der Prozesswässer)	53,5
Minimal-Szenario (99,9 % Kreislauf der Prozesswässer)	0,4

Welche Vorgehensweise mit Hinblick auf die Belastung des Prozesswassers zulässig und zielführend ist, kann allerdings final erst mit einer Prozessführung im Pilotmaßstab beantwortet werden, da die Aufkonzentrationseffekte im Wasser unzureichend im Labormaßstab untersucht werden können. Dennoch wird durch Praxisbeispiele anderer Aufbereitungsverfahren und -anlagen erwartet, dass das Minimal-Szenario mit einer internen Wasserausbereitung zur Abscheidung von feinen Schwebstoffen z.B. durch Filtration und einen Lamellenabsetzer umsetzbar ist. Für die weitere Berechnung der Wirtschaftlichkeit wurde daher mit der Wassermenge von 0,4 m³/t Input gerechnet.

Für die Erstellung einer Investitions-Liste wurden aus den bestimmten Verfahrensstufen die dafür notwendigen und an die Durchsatzmengen angepassten Aggregate bestimmt und mit notwendigen Installationskosten versehen. Auch die Antriebsleistungen wurden dafür

¹⁹ Eine t bezieht sich auf Shredder-Sand-Input

bestimmt und für die Betriebskosten dokumentiert. Auch hier wurde die nass-chemische Verfahrensführung nicht berücksichtigt, da die notwendigen Prozessstufen für die Überführung der mineralisch-metallischen Fraktion (nach Mahlung und Siebung), sowie die Konditionierungsparameter für andere, bereits bestehende oder in Planung befindliche hydrometallurgische Stufen derzeit nicht absehbar sind. Die Auflistung gibt Tabelle 30 wieder:

Tabelle 30: Zusammenstellung notwendiger Investitionen für eine Aufbereitungsanlage für Shredder-Sand ohne nass-chemische Aufbereitungsstufen [SICON]

Anzahl	Bezeichnung	Lieferant	Typ	Abmessung (H x B x T) / mm	Antrieb / kW	Preis / €
2	Flotations- scheider	MBE	Pneufлот M-FV 35 NS	Ø 4.200 x 11.125 x 5.450	180,0	410.000
6	Nass- Trenntisch	Holman- Wilfey	Holmann 8000	4.000 x 2.500 x 6.500	3,0	246.000
3	Magnet- abscheider	MBE	PTNS 630	4.320 x 1.873 x 1850	16,5	489.000
1	Stabmühle	MBE	50U	1.540 x 3240 x 4.380	90,0	190.000
1	Nass-Sieb	Fines	60“ 2 Deck	Ø 1.990 x 1.500	5,0	33.000
1	Stabmühle	MBE	35U	1.200 x 2.560 x 3.275	22,0	100.000
1	Nass-Sieb	Fines	60“ 2 Deck	Ø 1.990 x 1.500	5,0	33.000
Zwischensumme Maschinentechnik					321,5	1.501.000
1	Anlagen- steuerung	Pinnacle	Intelli TM Europe inkl. Schaltschrank, Mess- /Regeltechnik			225.150
1	Stahlbau	Lokal	Sämtliche Bühnen, Begehungen, Geländer, Treppen			300.200
1	Abwasser- modul	AWAS	Kreislaufwasseraufbereitung			375.250
1	Pumpen- system	AWAS	Pumpen-Fördertechnik für gesamte Anlage			280.000
1	Montage	FEBO	Mechanische und elektrische Montage der Anlage			804.480
1	Inbetrieb- nahme	diverse	Inbetriebnahme der Komponenten und Anlage			55.000
1	Engineering	diverse	Planungskosten exkl. Genehmigung			207.138
1	Projekt- management	diverse	Projektentwicklung			200.000
Summe					321,5	3.948.218

Damit ergibt sich ein Grundpreis für den Aufbau einer Aufbereitungsanlage für Shredder-Sand von rund 4 M €. Aus den so erarbeiteten Aggregat-Zusammenstellungen konnte ein

Verfahrensbild mit Medienversorgung und Verfahrensschnittstellen (Abbildung 31) erarbeitet werden:

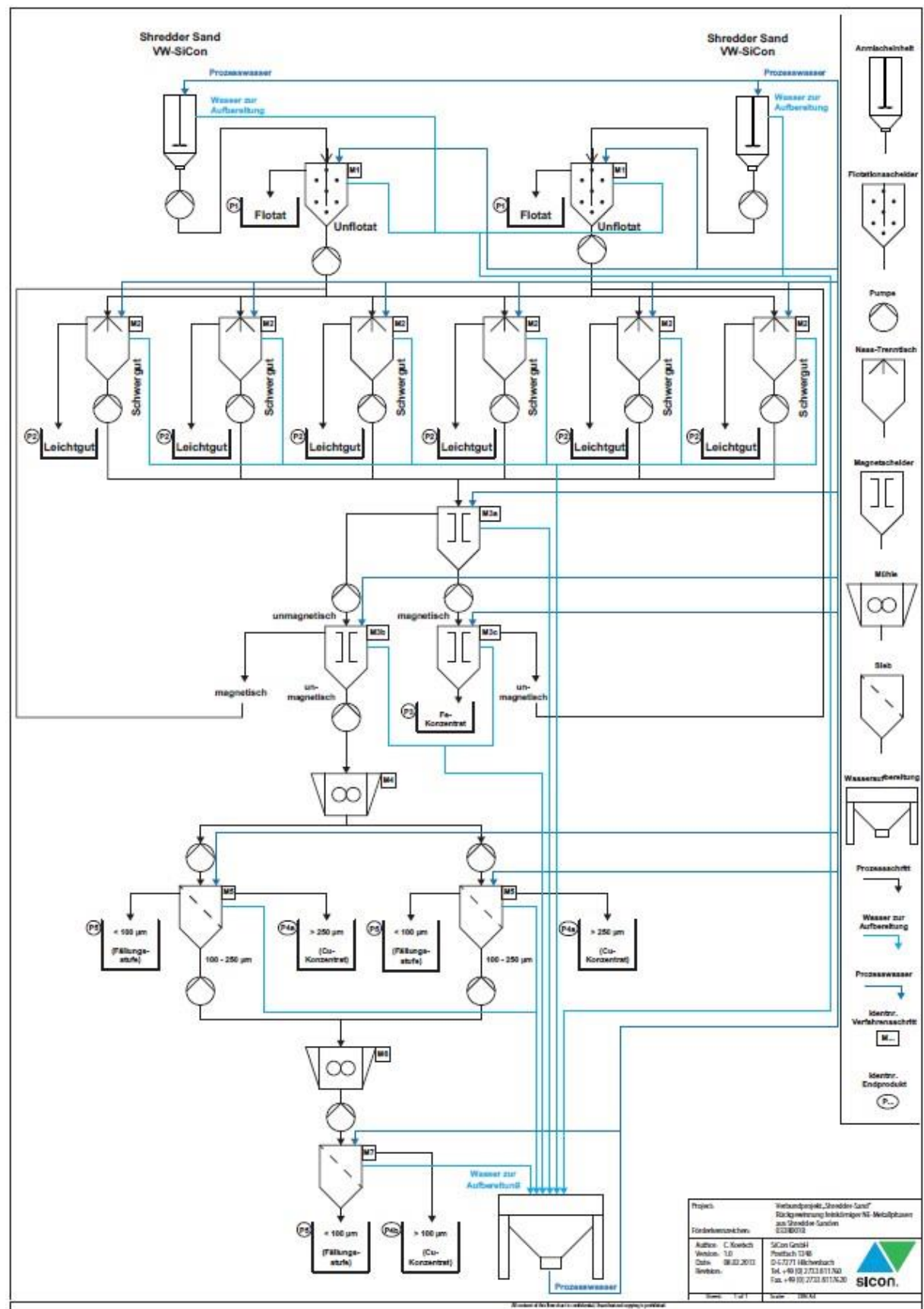


Abbildung 31: Verfahrensfließbild mit Medienversorgung und Schnittstellen [SICON]

Für die Verbildlichung der Abschätzung der notwendigen Fläche für eine entsprechende Anlage wurden dreidimensionale Flächenbelegungsskizzen der Einhausungen angefertigt, die im Anhang angefügt sind.

6.2 Klärung relevanter Fragen zum abfallrechtlichen Genehmigungsverfahren

Abhängig von der Einstufung der Aufbereitungsanlage für Shredder-Sand in die Spalte 1 oder 2 des Anhanges zur 4. BImSchV (siehe Kapitel 1.2.3) entstehen unterschiedliche Anforderungen an die einzureichenden Unterlagen für die Genehmigung.

Die gemäß Absatz 3 des § 4a der 9. BImSchV geforderten Unterlagen sind für das vorliegende Projekt nicht relevant, da es sich nicht um eine Anlage zur Verbrennung oder Mitverbrennung handelt.

Zur Einschätzung der Genehmigungsfähigkeit bzw. –einordnung fanden Gespräche mit einer BVSE-Justiziarin statt.

Zunächst ist die Frage zu beantworten, ob es sich beim Abfall „Shredder-Sand“ um „gefährliche“ Abfälle im Sinne des Bundesimmissionsschutzgesetzes handelt. Shredder-Sand ist ein aus der Shredderleichtfraktions-Aufbereitung entstandener Abfallstrom, der nach AVV der Schlüsselnummer 19 12 09 (Mineralien) zuzuordnen ist und als „nicht gefährlich“ im Sinne des BImSchG eingestuft wird.

Abgrenzungsrelevant ist die Verfahrensumsetzung: Eine „vollständige“ Umsetzung des Verfahrens inklusive chemischer Stufen würde in der Einstufung in Nr. 8.10 des Anhanges der 4. BImSchV führen, während der Verzicht auf den chemischen Teil in Nr. 8.11 des Anhanges der 4. BImSchV führt.

Die vorgenommene Reduzierung auf eine rein mechanische Aufbereitung des Shredder-Sandes ergibt eine Einstufung des Vorhabens in die Spalte 2 von Nr. 8.11.b.bb und somit zu einer Genehmigung nach §19 BImSchG (vereinfachtes Verfahren).

Die zu erbringenden Unterlagen liegen teilweise als Teil der Anlagenkonzeptionierung bereits vor, sind aber durch ein Detail Engineering nebst notwendigen Gutachten (z.B. Lärmemissionsgutachten) zu ergänzen.

Als Ergebnis der Klärungen abfallrechtlicher Genehmigungsverfahren kann so festgestellt werden, dass die Genehmigungsfähigkeit der geplanten Anlage als gegeben angesehen wird.

6.3 Ökonomische Wirkung bei der Umsetzung des Verfahrens

6.3.1 Ermittlung der Logistikkosten für In- und Outputwege

Für die Ermittlung der Kosten wurde von den Auslegungsdaten (Siehe Kapitel 6.1.2) ausgegangen. Grundlage der Berechnungen ist, dass der bzw. den hier geplanten Anlage(n) eine Verwertung nach dem patentierten Volkswagen-SiCon-Verfahren vorgeschaltet wird.

Das durchschnittliche Schüttgewicht von Shredder-Sand beträgt ca. 1 g/cm^3 , sodass mit Standard-Sattelaufliegern (wie bei Schrotttransporten) als Schüttgut mit $30\text{-}40 \text{ m}^3$ Ladevolumen ca. 25 Tonnen pro Fahrzeug beladen werden können. Auf die Szenarien bezogen bedeutet dies die in Tabelle 31 dargestellten Transporte:

Tabelle 31: Transportsituation beider Szenarien mit logistischer Mengenbestimmung [SICON]

Szenario	Transporte pro Jahr und Anlage	Transporte pro Woche und Anlage	Anlieferungen pro Tag
Zentrale Anlage	2.400	50	10
Dezentrale Anlage	800	15	3

Für die Entfernungen der Anlieferungstransporte wesentlich ist der Standort oder die Standorte der Aufbereitungsanlage(n). Es ist davon auszugehen, dass die Summen der zu transportierenden Stoffe mengenmäßig in den beiden Szenarien zwar gleich sind (eine Anlage à 60.000 t/a im Vergleich zu drei Anlagen à 20.000 t/a), die Gesamtstrecken der Anlieferungen aufgrund der Standorte jedoch unterschiedlich sein werden. Eine Aussage über die genauen Einsparpotenziale ergibt sich aus den Anfallstellen und den unterschiedlichen Standorten der Shredder-Sandaufbereitungsanlagen.

Kostenmäßig wird, wie branchenüblich, von Preisen frei angeliefert ausgegangen, sodass die Wirtschaftlichkeitsberechnungen in Kapitel 6.3.2.3 bei beiden Szenarien von gleichem Annahmepreis ausgehen. Das Verbesserungspotenzial durch Erhöhung des Annahmepreises bei Szenario 2 (durch verringerte Transportkosten des Anlieferers) ist zwar erkannt, muss aufgrund der Ungenauigkeit allerdings außer Acht gelassen werden.

Outputbezogen wurden alle Preise ebenfalls „EX WORKS“ (ab Hof) kalkuliert, sodass der Einfluss der Entfernung zum finalen Abnehmer hier aufgrund der Unbestimmtheit neutralisiert wurde. Auch hier ist ein Einsparpotenzial zugunsten des Szenarios 2 zu erwarten,

da sich die Transportdistanzen im Vergleich zur zentralen Anlage (Szenario 1) verringern würden.

6.3.2 Ermittlung der Kosten und Erlöse für Input und Output, Marktentwicklung

6.3.2.1 Input

Der Annahmepreis für Shredder-Sand muss sich grundsätzlich dem regionalen Wettbewerb stellen. Dies sind die Deponierung, die Verbringung im Untertageversatz und die Mitverbrennung in Müllheizkraftwerken.

Als Annahmepreis für eine Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage wird mit einem Preis von 60 €/t frei angeliefert kalkuliert.

Werden Stoffe, die mit Shredderleichtfraktion vergleichbar sind deponiert, kann von Annahmepreisen zwischen 45 und 75 €/t, im Durchschnitt 60 €/t frei angeliefert ausgegangen werden. Gängige Praxis derzeit in Deutschland ist die Verbringung unter Tage als Verfüllmaterial. Für die Anlieferung von abgesiebter Shredderleichtfraktion werden derzeit ca. 60-70 €/t berechnet. Alternative zu diesen beiden Entsorgungs- bzw. Verwertungswegen ist die Mitverbrennung in Müllheizkraftwerken. Aufgrund des geringen Heizwertes und des hohen mineralischen Anteils sind die Annahmepreise hierfür allerdings tendenziell höher.

Die weitere Entwicklung der Annahmepreise für Shredder-Sand wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Neben wirtschaftlichen und verfahrenstechnischen Entwicklungen haben auch gesetzliche Vorgaben großen Einfluss. Beispielhaft seien hier die Abfallgesetzgebung (Einstufung von Verfüllung als nicht dem Recycling zuzuordnen, sondern der „sonstigen stofflichen Verwertung“), die Altfahrzeuggesetzgebung (Quotenvorgaben) und die Deponiegesetzgebung (Deponierungsverbote) genannt. Aufgrund dieser Komplexität wurde der Einfluss des Annahmepreises von Shredder-Sand auf die Wirtschaftlichkeit einer Aufbereitungsanlage im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse untersucht und in Kapitel 6.3.2.4 dargestellt.

6.3.2.2 Output

Die Outputprodukt-Übersicht orientiert sich an der Massenbilanz gemäß Kapitel 6.1. Zur Einordnung der Absatzmöglichkeiten wurden anhand von Exposés und Analysen Gespräche mit potenziellen Abnehmern geführt und die Einsatzmöglichkeiten und –grenzen sowie Preisvorstellungen diskutiert. Die erstellten Einzelexposés sind im Anhang aufgeführt.

Konkret wurden die in Tabelle 32 aufgeführten Unternehmen hinsichtlich der Abnahme und Bepreisung von einer oder mehreren Fraktionen aus der Shredder-Sand-Aufbereitung angefragt.

Tabelle 32: Auflistung der für die aufgeführten Fraktionen angefragten Abnehmer nach Output-Fraktion [SICON]

Fraktion mit Kurzbezeichnung	Angefragt bei
P01 - Flotat	Kraftwerk Schwedt GmbH & Co. KG Ecoloop GmbH E.ON Energy from Waste AG
P02 - Leichtgut	Kraftwerk Schwedt GmbH & Co. KG Ecoloop GmbH E.ON Energy from Waste AG
P03 - Eisen-Konzentrat	DK Recycling und Roheisen GmbH Aurubis AG
P04 - Kupfer-Konzentrat	Aurubis AG
P05 - Baustoff-Konzentrat	Bauhaus Universität Weimar
P06 - Fällungsschlamm	Recylex GmbH Xstrata Zink GmbH Salzgitter AG Deutsche Erz- und Metall-Union (DEUMU) GmbH Nickelhütte Aue GmbH World Resources Company (WRC) GmbH TechnoSan Umwelt GmbH Brandmayr & Co. Entsorgungs GmbH Recycling Nord (ReNo) GmbH

Die Rückmeldungen sind detailliert in der Anlage dargestellt. Zur Berechnung der Produktkosten wurden die jeweils zugesagten Abnahmepreise kalkuliert ohne Berücksichtigung von Optimierungspotenzialen der Shredder-Sand-Aufbereitung und dadurch einhergehender Optimierung der Produktqualitäten.

Die für die anschließende Investitions- und Betriebskostenabschätzung genutzten Preise der Edukte und Produkte sind in der folgenden Tabelle 33 dargestellt:

Tabelle 33: Kosten und Erlöse, die der wirtschaftlichen Betrachtung zugrunde liegen nach [SICON]

Produkt	Erlöse	Kosten
Annahme Shredder-Sand	60 €/t	
Eisen-Konzentrat		40 €/t
Kupfer-Konzentrate	1.465 €/t	
Organikfraktionen		50 €/t
Mineralikfraktion		60 €/t

6.3.2.3 Investitions- und Betriebskostenabschätzung

Auf Grundlage der bisher ermittelten Daten, wie z.B. Massenstrom und Investitionskosten wurden durch die SICON zwei konkrete Szenarien zur Investitions- und Betriebskostenabschätzung der Shredder-Sand-Aufbereitung entwickelt. Tabelle 34 stellt die dazu erzeugten Basisdaten dar.

Tabelle 34: Basisdaten und Annahmen zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit nach [SICON]

Basisdaten und Annahmen	Szenario 1	Szenario 2
Input (kalk.)	61.200 t/a	20.400 t/a
Input (real)	12 t/h	4 t/h
Anzahl Arbeitsschichten pro Tag	3	3
Anzahl Arbeitsstunden pro Schicht	8 h	8 h
Anzahl Arbeitstage pro Woche	5 d/w	5 d/w
Anzahl Arbeitswochen pro Jahr	50 w/a	50 w/a
Anzahl Arbeitsstunden pro Jahr, kalkulatorisch	6.000 h/a	6.000 h/a
Anlagenverfügbarkeit	85 %	85 %
Effektive Produktionsstunden pro Jahr	5.100 h/a	5.100 h/a
Investitionen in Maschinen/Ausstattung/Planung	3.950.000 €	3.130.000 €
Investition in Gebäude und Gelände	850.000 €	650.000 €

Es ergeben sich in Summe ca. 4.800.000 € als Investitionssumme für eine zentrale Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage (Szenario 1), würde diese „auf der grünen Wiese“ gebaut werden. Dies beinhaltet neben den in Kapitel 6.1 ermittelten Maschinenkosten auch Investitionen in Gebäude und Gelände in Höhe von 850.000 €. Für eine kleinere Anlage, wie sie für das dezentrale Szenario angedacht wurde (Szenario 2), belaufen sich die Kosten auf Rund 3.780.000 €. Für die Kostenabschätzung einer Aufbereitungsanlage wurden daraufhin sowohl die Gesamtkosten pro Jahr und die Gesamtkosten pro Tonne Input-Material bestimmt (Tabelle 35).

Tabelle 35: Jährliche Kostenabschätzung einer Aufbereitungsanlage für Shredder-Sand nach [SICON]

Kostenabschätzung	Szenario 1	Szenario 2
Abschreibung auf Maschinentechnik über 8 Jahre	444.375 €	352.125 €
Restwert Maschinentechnik nach Ablauf der kalk. Nutzungsdauer bei 10 % Restwert	395.000 €	313.000 €
Abschreibung auf Gelände-/Gebäudetechnik über 20 Jahre	40.375 €	30.875 €
Restwert Gelände-/Gebäudetechnik nach Ablauf der kalk. Nutzungsdauer bei 5 % Restwert	42.500 €	32.500 €
Zinsen auf den Kapitalaufwand bei 5 % pro Jahr	120.000 €	94.500 €
Kosten für Versicherung bei 1,5 % pro Jahr	72.000 €	56.700 €
Personalkosten	450.000 €	450.000 €
Anzahl Arbeiter pro Schicht	3	3
Brutto-Stundenlohn inkl. LNK	25	25
Energiekosten	108.192 €	77.616 €
Ø-Verbrauch	70 %	70 %
Installierte Leistung [kW]	322	231
Einheitspreis [€ pro kWh]	0,08 €	0,08 €
Kosten für Frischwasserverbrauch bei 4 l/t zu 1,50 €/m³	36.720 €	12.240 €
Kosten für Abwassereinleitung bei 4 l Frischwasser /t zu 1,30 €/m³	31.824 €	10.608 €
Kosten für sonstige Betriebsmittel (pauschal)	40.000 €	40.000 €
Wartungs-/Reparaturkosten bei jährlich 3 %	144.000 €	113.400 €
Verschleißkosten bei 8 €/t Shredder-Sand	489.600 €	163.200 €
Gesamtkosten pro Jahr	2.077.086 €	1.501.264 €
Gesamtkosten pro Tonne	33,94 €	73,59 €

Dazu können die dem Erlös gegenüberstehenden Kosten bestimmt werden. Es ist bereits ersichtlich, dass, bezogen auf die Menge, die Kosten pro Tonne bei steigenden Durchsätzen sinken.

Im nächsten Schritt wurden die Erlöse und Kosten der einzelnen Fraktionen bestimmt (Tabelle 36), um sie den Kosten der Anlage gegenüber stellen zu können.

Tabelle 36: Vermarktungssituation von Shredder-Sanden unter den gemachten Randbedingungen nach [SICON]

Kosten und Erlöse der Produkte	Szenario 1	Szenario 2	Share [%]
Annahmeerlös für Shredder-Sand bei 60 €/t	3.672.000 €	1.224.000 €	100,00
Kosten für Eisen-Konzentrat bei 40 €/t	-641.621 €	-213.874 €	26,21
Erlös für Kupfer-Konzentrate bei 1.465 €/t	1.192.451 €	397.484 €	1,33
Entsorgungskosten für Organikfraktionen bei 50 €/t	-731.952 €	-243.984 €	23,92
Kosten für Mineralikfraktion bei 60 €/t	-1.782.389 €	-594.130 €	48,54
Transportkosten bei 10 €/t (alle Produkte EXW)	0 €	0 €	0,00
Gesamtprodukterlöse pro Jahr	1.708.490 €	569.497 €	
Gesamtprodukterlöse pro Tonne	27,92 €	27,92 €	

Die erhaltenen Produkterlöse können nun ins Verhältnis gesetzt werden, um die abschliessende Wirtschaftlichkeit der Anlage zu bestimmen (Tabelle 37).

Tabelle 37: Betriebsergebnisse, Amortisationszeiträume und ROI für unterschiedliche Szenarien der Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage nach [SICON]

Betriebsergebnis	Szenario 1	Szenario 2
Gesamtkosten	2.077.086 €/a	1.501.264 €/a
Gesamtprodukterlöse	1.708.490 €/a	569.497 €/a
EBITDA (Ergebnis vor Steuern, Zinsen, Abschreibung)	236.154 €/a	-454.267 €/a
EBITDA	3,86 €/t	-22,27 €/t
EBIT (Ergebnis vor Steuern, Zinsen)	-248.596 €/a	-837.267 €/a
EBIT	-4,06 €/t	-41,04 €/t
EBT (Ergebnis vor Steuern)	-368.596 €/t	-931.767 €/t
EBT	-6,02 €/t	-45,67€/t
Amortisationszeit	18 Jahre	-
Amortisationszeit	222 Monate	-
ROI (Return of Investment)	-7,6 %	-21,29 %

Die Erklärung, dass die Anlage (Szenario 1) eine Amortisationszeit von 18 Jahren hat, trotz negativem ROI ergibt sich daraus, dass die Amortisationsberechnung aus der EBITDA erfolgt, also vor Abzug der Steuern, Zinsen und Abschreibung. Der ROI wiederum wird nach Abzug der Abschreibungen gebildet, was zu einem negativen Wert führt.

Unter Berücksichtigung der vorkalkulierten Kapital-, Betriebs- und Produktverwertungskosten lässt sich somit momentan kein Szenario für eine vollständig neu zu bauende Anlage („auf der grünen Wiese“) mit positivem ROI, also im Bereich einer profitablen Marktsituation darstellen. Welche Auswirkungen geänderte Randbedingungen auf dieses Ergebnis haben, wird in den folgenden Sensitivitätsanalysen ermittelt.

6.3.2.4 Sensitivitätsanalysen

Für die grundsätzliche Bestimmung der Optionen zur Vermarktung von Konzentraten aus Shredder-Sanden wurden unterschiedliche Szenarien auf der Grundlage von Tabelle 36 ermittelt. Der durchschnittlicher Marktpreis für die Annahme von Shredder-Sanden von etwa 60 €/t (Q3/2012) wurde als Ausgangspunkt für eine Sensitivitätsanalyse des Annahmepreises zugrunde gelegt und gesteigert, um den Punkt der Wirtschaftlichkeit zu bestimmen.

Ein wichtiger Aspekt dieser Analyse liegt darin, dass der Abgabepreis für Mineralikfraktionen an den Annahmepreis für Shredder-Sande gekoppelt ist: Wenn der Annahmepreis für Shredder-Sande steigt, kann dies nur dann erfolgen, wenn andere Verwertungs- oder Beseitigungswege im Annahmepreis steigen. Dadurch würde sich zwangsläufig auch der Abgabepreis der Mineralikfraktionen erhöhen, was zu einer Dämpfung des positiven Effekts führen würde. Dieser Effekt wurde in der Berechnung berücksichtigt.

Das sich durch Änderungen im Annahmepreis ändernde Betriebsergebnis vor Steuern (EBT pro Tonne) entwickelt sich wie in Tabelle 38 und Abbildung 32 dargestellt.

Tabelle 38: Datengrundlage zur Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeit bei veränderlichem Annahmeerlösen von Shredder-Sand nach [SICON]

Annahmeerlös Shredder-Sand	EBT bei Szenario 1 in €/t	EBT bei Szenario 2 in €/t
60,00 €	-5,02 €	-45,67 €
70,00 €	-0,88 €	-40,53 €
80,00 €	4,27 €	-35,38 €
90,00 €	9,42 €	-30,24 €
100,00 €	14,56 €	-25,09 €
110,00 €	19,71 €	-19,94 €
120,00 €	24,85 €	-14,80 €

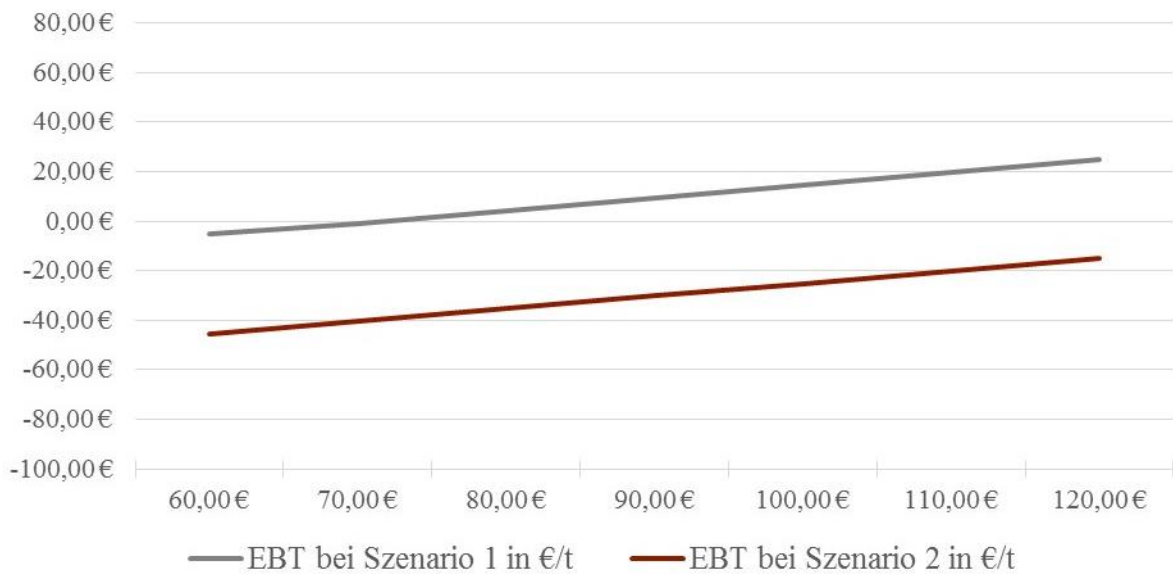


Abbildung 32: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlichen Annahmepreisen von Shredder-Sand nach [SICON]

Aus der Berechnung ist ersichtlich, dass ab einem Annahmepreis von ca. 78 €/t die Anlage in Szenario 1 (bei 60.000 t pro Jahr Durchsatz) wirtschaftlich betrieben werden kann. Eine Anlage nach Szenario 2 (Jahresdurchsatz von ca. 20.000 t) kann auch bis 120 € als Annahmepreis für Shredder-Sand nicht wirtschaftlich arbeiten. Der Break-Even liegt hier bei einem Annahmepreis für Shredder-Sand von ca. 150 €/t.

Die Dämpfung des Erlöses durch die mitsteigenden Abgabepreise zur Beseitigung der mineralischen Fraktion kann dadurch durchbrochen werden, dass aus der Fraktion zur Beseitigung die in der Verfahrensentwicklung vorgestellten Fraktionen zur Verwertung erzeugt werden. Dies meint vor allem die Aufbereitung der Mineralikfraktion zu mineralischem Konzentrat und weiteren Metallfraktionen (z.B. Kupfer, Aluminium, Zink, Blei). Dieser Effekt kann durch die Integration des hydrometallurgischen Verfahrens in Prozesse der Recylex erreicht werden.

Um auch den Einfluss des Abgabepreises der Konzentrate zu untersuchen und deren Wirkung auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage, wurden Analysen bei steigenden Konzentrat-Preisen durchgeführt. Diese Steigerungen im erzielbaren Erlös wären durch eine weitere Steigerung in der Produktqualität erzielbar. Weiterhin können durch die Marktsituation, als auch bei Variation in den Anforderungen an die Begleitelemente des Eisen-Konzentrats und des Kupfer-Konzentrats positive Änderungen im Preissegment erwartet werden. Es wurde daher im ersten Schritt eine Steigerung des Verkaufspreises von -40 €/t auf +100 €/t Eisen-

Konzentrat simuliert. Die sich dadurch ändernde Entwicklung des Betriebsergebnisses gestaltet sich wie folgt (s. Tabelle 39, Abbildung 33):

Tabelle 39: Zahlenbasis der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Abgabepreise von Eisen-Konzentraten nach [SICON]

Kosten Eisen-Konzentrat	EBT bei Szenario 1 in €/t	EBT bei Szenario 2 in €/t
-20,00 €	-0,78 €	-40,43 €
0,00 €	4,46 €	-35,19 €
20,00 €	9,70 €	-29,95 €
40,00 €	14,95 €	-24,71 €
60,00 €	20,19 €	-19,46 €
80,00 €	25,43 €	-14,22 €
100,00 €	30,67 €	-8,98 €



Abbildung 33: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Abgabepreise von Eisen-Konzentraten nach [SICON]

Bereits ab einer Abgabe des Fe-Konzentrates für ca. 0 €/t kann eine Anlage in Szenario 1 wirtschaftlich arbeiten.

Der im Vergleich zum Markt als gering einzuschätzende Erlös für die Kupferfraktion liegt gemäß Aussagen des vorgesehenen Abnehmers (Fa. Aurubis) an dem hohen Anteil an Glühverlustträgern im Kupferkonzentrat. Um eine mögliche Prozessverbesserung zu

simulieren, wurde daher eine weitere Sensitivität auf der Annahme kalkuliert, dass sich der Kupferanteil im Konzentrat erhöht. Dies geschieht nicht durch die generelle Erhöhung des Kupfergehalts im Aufgabematerial, sondern durch Abreicherung der Begleitstoffe in den Kupferkonzentraten ohne nennenswerten Ausbringungsverlust. Eine Sensitivitätsanalyse zu dem sich dadurch veränderten EBT ist im Folgenden (Tabelle 40, Abbildung 34) dargestellt:

Tabelle 40: Zahlenbasis der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Kupfer-Konzentrationen und damit geänderter Abgabepreise des Kupfer-Konzentrates nach [SICON]

Erlös für Kupfer-Konzentrat / €	Anteil Kupfer im Konzentrat / %	Anteil Konzentrat an Gesamtinput / %	EBT bei Szenario 1 / €/t	EBT bei Szenario 2 / €/t
248,00	8,00	4,63	-12,37	-61,86
484,00	13,25	2,93	-10,53	-58,72
720,00	18,50	2,20	-9,23	-55,58
956,00	23,75	1,78	-8,27	-52,44
1.193,00	29,00	1,52	-7,28	-49,29
1.465,00	34,25	1,33	-6,02	-45,67
1.665,00	39,50	1,20	-5,59	-43,01
1.901,00	44,75	1,05	-5,69	-39,88
2.138,00	50,00	1,02	-3,85	-36,72

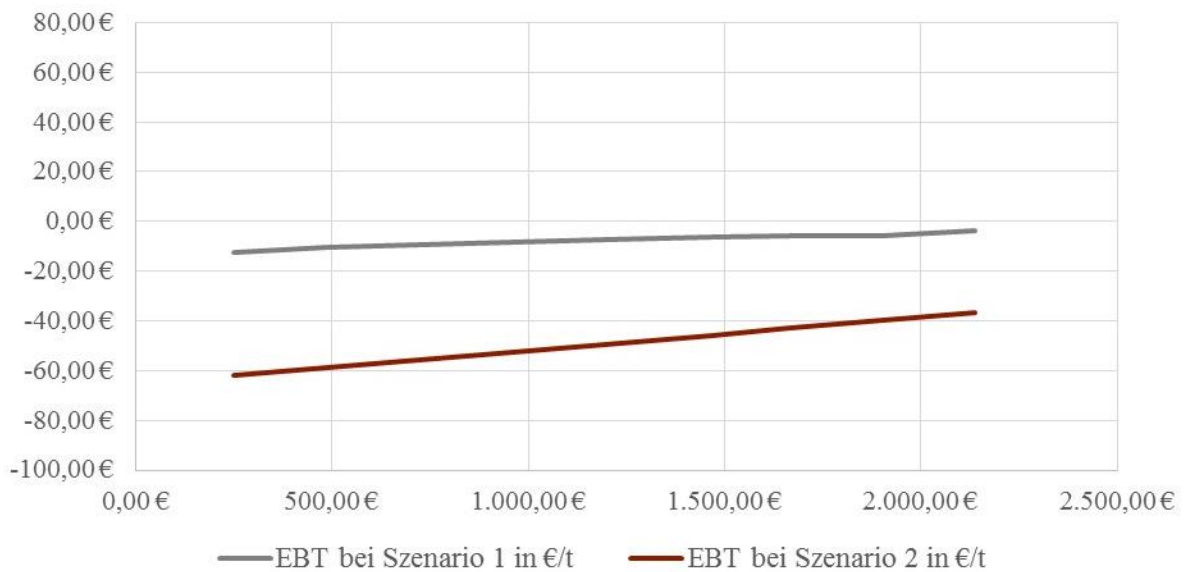


Abbildung 34: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit bei veränderlicher Kupfer-Konzentrationen und damit geänderter Abgabepreise des Kupfer-Konzentrates nach [SICON]

Wesentliche Erkenntnis dieser Sensitivitätsbetrachtung ist der geringe Einfluss auf das Betriebsergebnis (EBT pro Tonne) selbst bei einer Kupferanreicherung auf 50%. Erhebliche Schwankungen in den LME-Notierungen wurden nicht berücksichtigt.

Eine weitere Sensitivitätsanalyse wurde vor dem Hintergrund erarbeitet, den Einfluss der Frischwassermenge auf das Betriebsergebnis darstellen zu können. Die Planungsprämisse des Wasserverbrauchs ist aufgrund der Abhängigkeit von der Prozessführung und der damit zusammenhängenden Anreicherung von Schadstoffen die einzige, die nicht im Labor nachgewiesen werden konnte. Um dennoch ein Bild zu erhalten, wie sich eine Steigerung des Wasserverbrauchs, ausgehend von 0,4 m³/t, auf die Marktsituation auswirkt, wurde die folgend dargestellte Sensitivitätsanalyse (Tabelle 41, Abbildung 35) durchgeführt. Der Wassererneuerungsbedarf wurde aus diesem Grund zwischen 0,4 m³/t (Minimal-Szenario) und 53,50 m³/t (Maximal-Szenario) proportional steigend berechnet.

Tabelle 41: Zahlenbasis der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung veränderlicher Wasserverbrauchsmengen und den dadurch entstehenden Kosten nach [SICON]

Wasserverbrauch / m³/t	EBT bei Szenario 1 in €/t	EBT bei Szenario 2 in €/t
0,40	-6,02	-45,67
7,14	-24,92	-64,55
13,88	-43,79	-83,42
20,61	-62,64	-102,26
27,35	-81,51	-121,13
34,09	-100,38	-140,01
40,83	-119,25	-158,88
47,56	-138,10	-177,72
53,50	-154,73	-194,35

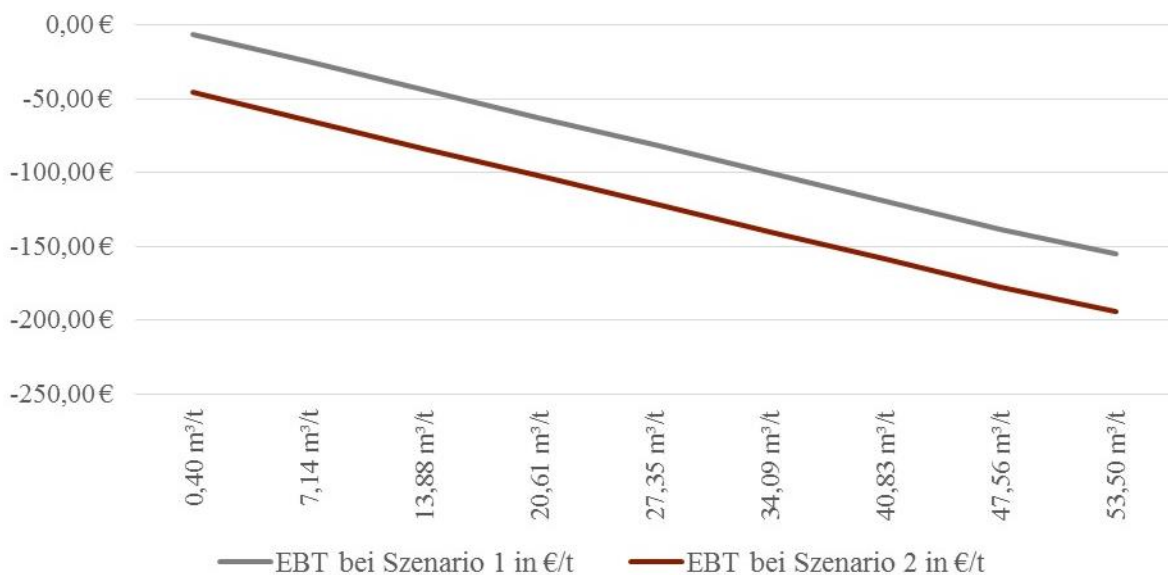


Abbildung 35: Graphische Darstellung der Sensitivitätsanalyse zur Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung veränderlicher Wasserverbrauchsmengen und den dadurch entstehenden Kosten nach [SICON]

Die Auswirkungen auf das Betriebsergebnis sind derart gravierend, dass eine realistische Beurteilung nur auf Basis eines Detail Engineering durch einen Experten auf dem Gebiet der Abwasseraufbereitung erfolgen kann. Im Rahmen eines Folgeprojektes (z.B. für eine Pilotanlage) sollte deshalb Wert auf ein ausführliches Detail Engineering für den Abwasserbereich gelegt werden.

6.3.3 Identifizierung optimaler Standorte einer möglichen Shredder-Sand-Aufbereitungsanlage

Es ist ersichtlich geworden, dass eines der Hauptprobleme der Wirtschaftlichkeit der Anlage in der Menge der zu behandelnden Stoffströme liegt, da absehbar ist, dass bei steigenden Input-Massen auch der Break-Even-Punkt des Annahmepreises weiter zu kleineren Beträgen hin verschoben werden kann. Diesbezüglich wurden im Rahmen einer eigens dafür vergebenen Studienarbeit [6] Szenarien entwickelt, die neben der Menge an in Deutschland theoretisch verfügbaren Shredder-Sanden auch die Shredder-Sande < 20 mm aus anderen Europäischen Staaten berücksichtigt. Daraus konnte der mögliche Shredder-Sand-Anfall an unterschiedlichen Standorten errechnet werden, unter der Prämisse, dass an den entsprechenden Standorten eine Volkswagen-SiCon-Anlage installiert sei. Es kann neben den optimalen Standorten dadurch auch das Potential europäischer Shredder-Sand-Aufbereitungsanlagen aufgezeigt werden.

Unter Zuhilfenahme zweier Berechnungsgrundlagen (Berechnung mit Erfahrungswerten und Berechnung mit ELV-Statistik) wurde das Shredder-Sand-Aufkommen in Europa bestimmt. Es wurden daraus Aussagen zum Shredder-Sand-Anfall in Regionen mit hohen Shredder-Durchsätzen abgeleitet. Interessante Regionen für potentielle Standorte von Shredder-Sand-Aufbereitungsanlagen konnten in Deutschland an der Belgischen Grenze, wie auch im Süden Englands, aber auch in Frankreich in der Nähe von Paris und im Norden von Italien identifiziert werden. Bei der Bestimmung der Shredder-Sand-Mengen wurde ein äquivalentes Vorgehen gewählt, wie es für die Mengenermittlungen der in Deutschland theoretisch verfügbaren Shredder-Sande zum Einsatz kam. Ausgegangen wird dabei von einem mittleren Anteil Shredder-Sande an der SLF von 12 M-%, was den in diesem Projekt gemachten Erfahrungen entspricht.

Ein Standort in Deutschland, im Grenzgebiet zu Belgien und den Niederlanden könnte, vorausgesetzt es würden auch nicht-deutsche Shredder-Sande eingesetzt werden, mit einer jährlichen Shredder-Sand-Menge von etwa 78.000 t/a versorgt werden, wobei der Einzugsradius knapp 300 km beträgt. Auch in England im Bereich der Stadt Hitchin konnte eine interessante Region identifiziert werden. Im Umkreis von rund 200 km fallen dort ca. 60.000 t/a Shredder-Sand an. Für die Region zwischen Paris und Nantes können im Mittel 64.500 t/a Shredder-Sand als potentiell vorhanden angesehen werden.

In einer geographischen Einordnung kann nur noch der Bereich im nördlichen Italien bei Mailand mit aufgenommen werden, hier fallen bei entsprechend ausgedehnten Zulieferwegen

Shredder-Sande in Mengen von ca. 37.500 t/a an. Weitere Standorte in Europa könnten nur mit Shredder-Sand-Mengen deutlich unter 40.000 t/a beliefert werden und hätten zusätzlich deutlich längere Lieferwege für den Input.

Zusammengefasst kann dadurch eine Karte Europas mit potentiellen Standorten für Aufbereitungsanlagen von Shredder-Sand erstellt werden (s. Abbildung 36).

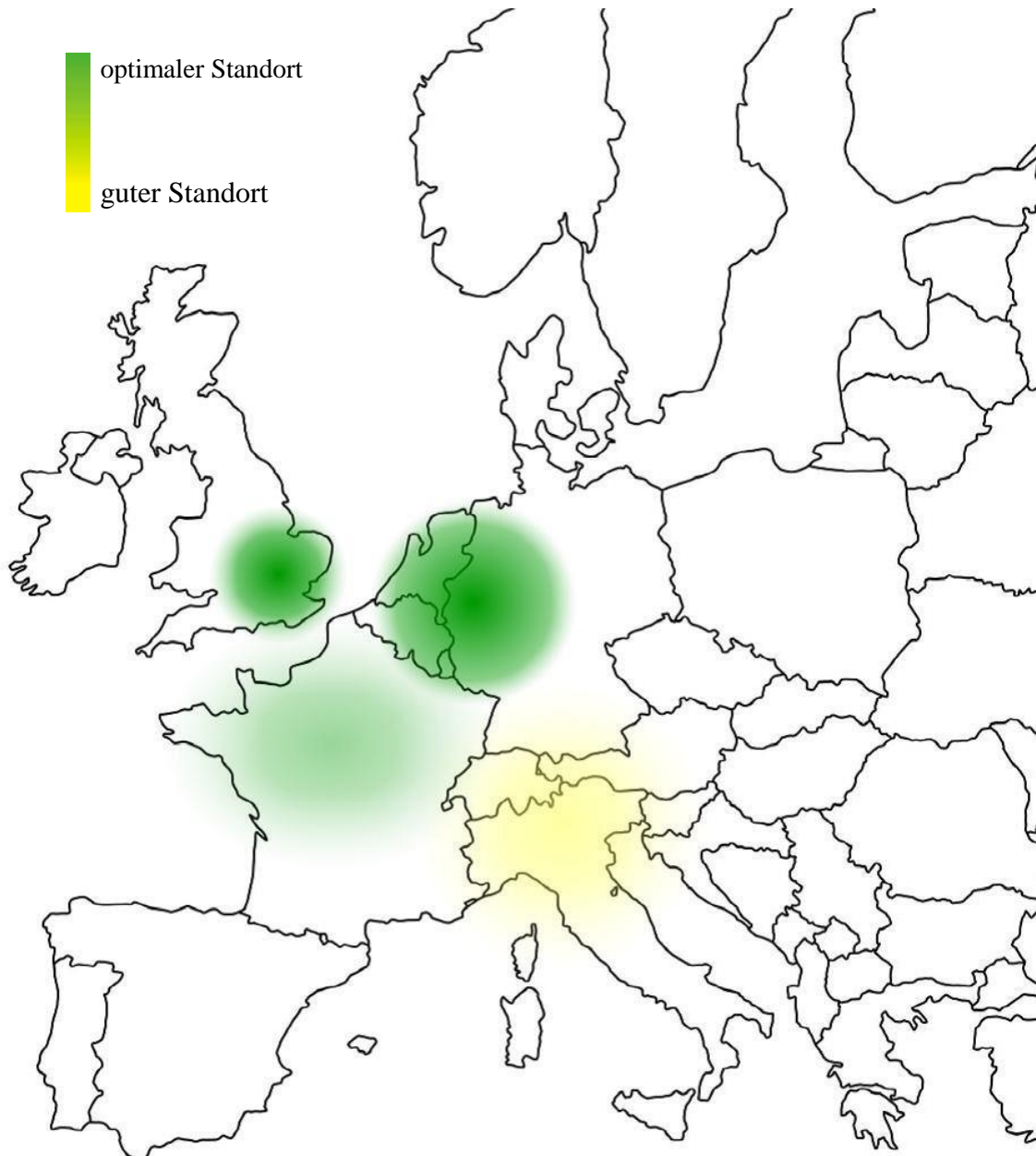


Abbildung 36: Übersicht möglicher Standorte für Shredder-Sand-Aufbereitungsanlagen [6]

Es zeigt sich durch diese Bestimmungen, dass die gemachten Ansätze für Deutschland mit Anpassungen an die teilweise höheren Shredder-Sand-Mengen in Europa auch Gültigkeit haben.

6.3.3.1 Businessplan und ökonomischer Ausblick

Perspektivisch wurde für die Erstellung des Businessplanes durch SICON davon ausgegangen, dass sich der Annahmepreis von Shredder-Sand in den ersten drei Jahren durch kontinuierlichen Betrieb der Anlage(n) und damit einhergehender Abnahmesicherheit für den Lieferanten sowie des damit verbundenen Quotenbeitrages²⁰ von 60 auf 80 €/t im dritten Jahr Anlagenbetrieb steigern lässt (siehe hierzu die Ausführungen zur ersten Sensitivitätsberechnung in Kapitel 6.3.2.4).

Außerdem wird davon ausgegangen, dass sich der Abgabepreis für das erzeugte Eisenkonzentrat durch Prozessoptimierung von derzeit -40,00 €/t auf +40,00 €/t steigern lässt (siehe hierzu die Ausführungen zur zweiten Sensitivitätsberechnung in Kapitel 6.3.2.4).

Kostenseitig wird davon ausgegangen, dass sich die Energiekosten für den Betrieb einer Shredder-Sand-Behandlungsanlage in den kommenden drei Jahren um 3-5 % (im Mittel 4 %) verteuern werden und auch die Personalkosten entsprechend der Inflationsrate von durchschnittlich 2 % steigen werden. Für den Frischwasserverbrauch wird die minimale Menge von 0,4 m³/t angenommen.

Durch den während des Anlagenbetriebes gewonnenen Skaleneffekt im Verschleiß- und Reparaturbereich wird von einer möglichen Senkung der Kosten im Reparatur-/Wartungs- und Verschleißbereich von durchschnittlich 5 % pro Jahr ausgegangen.

Abschreibungen und Zinskosten sind linear berechnet und werden entsprechend linear fortgeschrieben.

Es ergibt sich der in Tabelle 42 bis Tabelle 44 dargestellte betriebswirtschaftliche Ausblick für Szenario 1.

²⁰ Zur Altfahrzeugverwertungsquote nach AltfahrzeugV

Tabelle 42: Kostenabschätzung Szenario 1 [SICON]

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
Abschreibung auf Maschinentechnik über 8 Jahre	444.375 €	444.375 €	444.375 €
Restwert Maschinentechnik nach Ablauf der kalk. Nutzungsdauer bei 10 % Restwert	395.000 €	395.000 €	395.000 €
Abschreibung auf Gelände-/Gebäudetechnik über 20 Jahre	40.375 €	40.375 €	40.375 €
Restwert Gelände/Gebäudetechnik nach Ablauf der kalk. Nutzungsdauer bei 5 % Restwert	42.500 €	42.500 €	42.500 €
Zinsen auf den Kapitalaufwand bei 5 % pro Jahr	120.000 €	120.000 €	120.000 €
Kosten für Versicherung bei 1,5 % pro Jahr	72.000 €	72.000 €	72.000 €
Personalkosten	450.000 €	463.500 €	477.405 €
Anzahl Arbeiter pro Schicht	3	3	3
Brutto-Stundenlohn inkl. LNK	25,00	25,75	26,52
Energiekosten	108.192 €	112.520 €	117.020 €
Ø-Verbrauch	70 %	70 %	70 %
Installierte Leistung [kW]	322	322	322
Einheitspreis [€ pro kWh]	0,0800 €	0,0832 €	0,0865 €
Kosten für Frischwasserverbrauch bei 4 l/t zu 1,50 €/m³	36.720 €	36.720 €	36.720 €
Kosten für Abwassereinleitung bei 4 l Frischwasser /t zu 1,30 €/m³	31.824 €	31.824 €	31.824 €
Kosten für sonstige Betriebsmittel (pauschal)	40.000 €	40.000 €	40.000 €
Wartungs-/Reparaturkosten bei jährlich 3 %	144.000 €	136.800 €	129.960 €
Verschleißkosten bei 8 €/t Shredder-Sand	489.600 €	465.120 €	441.864 €
Gesamtkosten pro Jahr	2.077.086 €	2.963.234 €	1.951.543 €
Gesamtkosten pro Tonne	33,94 €	32,08 €	31,89 €

Tabelle 43: Kosten- und Erlössituation Szenario 1 [SICON]

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
Annahmepreis für Shredder-Sand bei Preisen von 60, 70 und 80 €/t	3.672.000 €	4.284.000 €	4.896.000 €
Verkaufserlös für Eisen-Konzentrat bei Preisen von -40, 0 und 40 €/t	-641.621 €	0 €	641.621 €
Verkaufserlös für Kupferkonzentrate konstant bei 1.465 €/t	1.192.451 €	1.192.451 €	1.192.451 €
Entsorgungskosten für Organikfraktionen konstant bei 50 €/t	-731.952 €	-731.952 €	-731.952 €
Abnahmepreis für Mineralikfraktion bei -60, -70 und -80 €/t	-1.782.389 €	-2.079.454 €	-2.376.518 €
Transportkosten konstant bei 10 €/t (alle Produkte EXW)	0 €	0 €	0,00
Gesamtprodukterlöse pro Jahr	1.708.490 €	2.665.046 €	3.621.602 €
Gesamtprodukterlöse pro Tonne	27,92 €	43,55 €	59,18 €

Tabelle 44: Betriebsergebnis Szenario 1 [SICON]

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
Gesamtkosten pro Jahr	2.077.086 €	1.963.234 €	1.951.543 €
Gesamtprodukterlöse pro Jahr	1.708.490 €	2.665.046 €	3.621.602 €
EBITDA pro Jahr	236.154 €	1.306.562 €	2.274.808 €
EBITDA pro Tonne	3,86 €	21,35 €	37,17 €
EBIT pro Jahr	-248.596	821.812 €	1.790.058 €
EBIT pro Tonne	-4,06 €	13,43 €	29,25
EBT pro Jahr	-368.596 €	701.812 €	1.670.058 €
EBT pro Tonne	-6,02 €	11,47 €	27,29 €

Perspektivisch könnte demnach eine Anlage nach Szenario 1 wirtschaftlich arbeiten, wenn sich die getroffenen Annahmen umsetzen ließen.

Für Szenario 2 ergibt sich der in Tabelle 45 bis Tabelle 47 dargestellte Ausblick.

Tabelle 45: Kostenabschätzung Szenario 2 [SICON]

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
Abschreibung auf Maschinentechnik über 8 Jahre	352.125 €	352.125 €	352.125 €
Restwert Maschinentechnik nach Ablauf der kalk. Nutzungsdauer bei 10 % Restwert	313.000 €	313.000 €	313.000 €
Abschreibung auf Gelände-/Gebäudetechnik über 20 Jahre	30.875 €	30.875 €	30.875 €
Restwert Gelände/Gebäudetechnik nach Ablauf der kalk. Nutzungsdauer bei 5 % Restwert	32.500 €	32.500 €	32.500 €
Zinsen auf den Kapitalaufwand bei 5 % pro Jahr	94.500 €	94.500 €	94.500 €
Kosten für Versicherung bei 1,5 % pro Jahr	56.700 €	56.700 €	56.700 €
Personalkosten	450.000 €	463.500 €	477.405
Anzahl Arbeiter pro Schicht	3	3	3
Brutto-Stundenlohn inkl. LNK	25,00	25,75	26,52
Energiekosten	77.616 €	80.721 €	83.949 €
Ø-Verbrauch	70 %	70 %	70 %
Installierte Leistung [kW]	231	231	231
Einheitspreis [€ pro kWh]	0,0800 €	0,0832 €	0,0865 €
Kosten für Frischwasserverbrauch bei 4 l/t zu 1,50 €/m ³	12.240 €	12.240 €	12.240 €
Kosten für Abwassereinleitung bei 4 l Frischwasser /t zu 1,30 €/m ³	10.608 €	10.608 €	10.608 €
Kosten für sonstige Betriebsmittel (pauschal)	40.000 €	40.000 €	40.000 €
Wartungs-/Reparaturkosten bei jährlich 3 %	113.400 €	107.730 €	102.344 €
Verschleißkosten bei 8 €/t Shredder-Sand	163.200 €	155.040 €	147.288 €
Gesamtkosten pro Jahr	1.501.264 €	1.404.039 €	1.408.034 €
Gesamtkosten pro Tonne	73,59 €	68,83 €	69,02 €

Tabelle 46: Kosten- und Erlössituation Szenario 2 [SICON]

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
Annahmepreis für Shredder-Sand bei Preisen von 60, 70 und 80 €/t	1.224.000 €	1.428.000 €	1.632.000 €
Verkaufserlös für Eisen-Konzentrat bei Preisen von -40, 0 und 40 €/t	-213.874 €	0 €	213.874 €
Verkaufserlös für Kupferkonzentrate konstant bei 1.465 €/t	397.484 €	397.484 €	397.484 €
Entsorgungskosten für Organikfraktionen konstant bei 50 €/t	-243.984 €	-243.984 €	-243.984 €
Abnahmepreis für Mineralikfraktion bei -60, -70 und -80 €/t	-594.130 €	-693.151 €	-792.173 €
Transportkosten konstant bei 10 €/t (alle Produkte EXW)	0 €	0 €	0,00
Gesamtprodukterlöse pro Jahr	569.497 €	888.349 €	1.207.201 €
Gesamtprodukterlöse pro Tonne	27,92 €	43,55 €	59,18 €

Tabelle 47: Betriebsergebnis Szenario 2 [SICON]

	Jahr 1	Jahr 2	Jahr 3
Gesamtkosten pro Jahr	1.501.264 €	1.404.039 €	1.408.034 €
Gesamtprodukterlöse pro Jahr	569.497 €	888.349 €	1.207.201 €
EBITDA pro Jahr	-454.267 €	-38.190 €	276.667 €
EBITDA pro Tonne	-22,27 €	-1,87 €	13,56 €
EBIT pro Jahr	-837.267	-421.190 €	-106.333 €
EBIT pro Tonne	-41,04 €	-20,65 €	-5,21 €
EBT pro Jahr	-913.767 €	-515.690 €	-200.833 €
EBT pro Tonne	-45,67 €	-25,28 €	-9,84 €

Wie bereits bei den Sensitivitätsanalysen einzeln ermittelt, wird auch ein grundsätzlich potenzialausschöpfender Ausblick nicht zu einem wirtschaftlichen Anlagenbetrieb führen können, da die Fixkosten der Anlagen die im Vergleich zu Szenario 1 geringen Durchsätze und Erlöse überragen.

Perspektivisch kann zur Verbesserung der Situation angeführt werden, dass das Material $< 100 \mu\text{m}$ an die bereits erwähnten hydrometallurgischen Behandlungsanlagen abgegeben werden könnte und neben den dadurch entstehenden Metallkonzentraten auch ein mineralisches Konzentrat zum Einsatz als RC-Baustoff mit möglicherweise positiven Marktaussichten generiert werden kann. Der Effekt auf die Wirtschaftlichkeit der Shredder-Sand-Aufbereitungsanlagen ist aufgrund der Datenunsicherheit und bisher nicht nachgewiesener Umsetzbarkeit allerdings nicht prognostizierbar. Die ersten Versuche deuten allerdings an, dass die gelaugte, mineralische Fraktion aus Shredder-Sanden als Ausgangsmaterial für Blähgranulate vergleichbar gute Materialeigenschaften aufweist und darüber hinaus Einsparmöglichkeiten bietet: Zum einen liegt die Sinter- und damit die notwendige Porosierungstemperatur unterhalb der von gängigen Tonen, zum anderen bestehen möglicherweise Einsparpotentiale beim Einsatz des Porosierungshilfsmittels SiC.

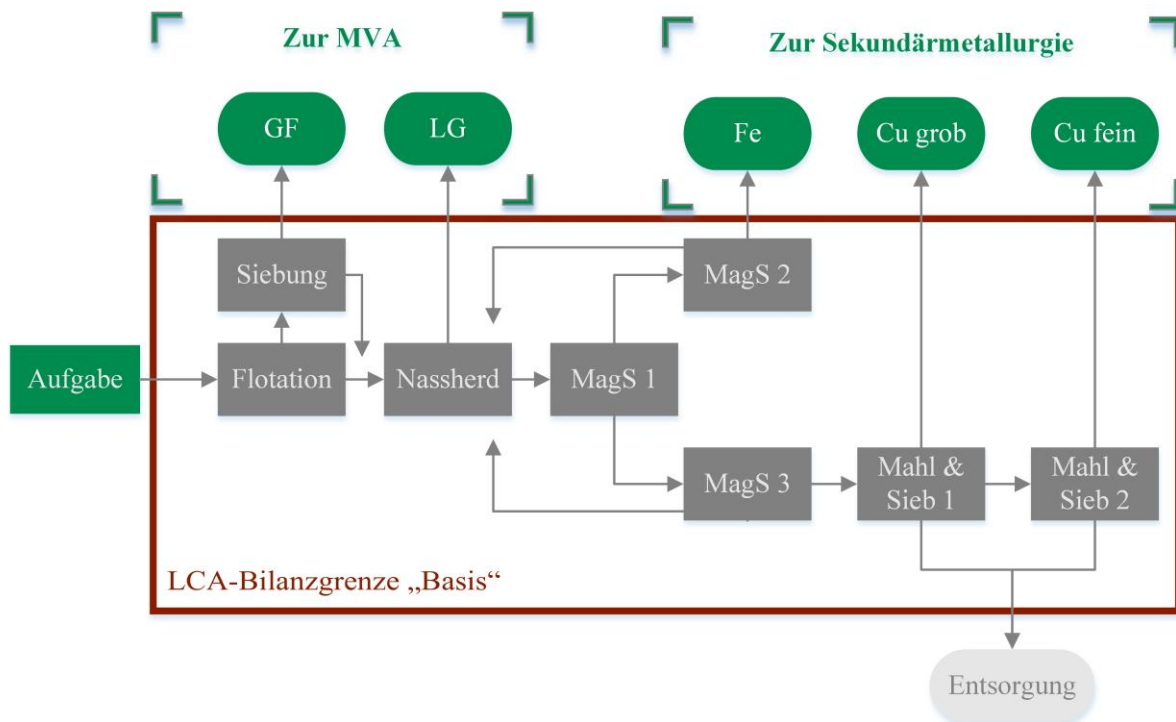
Letztlich ist bei der hier durchgeführten Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu berücksichtigen, dass es sich um die Neuplanung einer vollständigen Anlage ohne Berücksichtigung von „Ad-On“-Effekten handelt. Bei einer Umsetzung müssten mögliche Synergie-Effekte mit den industriell vor- oder nachgeschalteten Stufen gründlich und kritisch überprüft werden, um die bereits vorhandenen Behandlungsstufen nutzen zu können und so die Investitionssumme zu verringern.

Darüber hinaus gilt auch zu beachten, dass mit der Aufbereitung der Shredder-Sande auch ein Beitrag zur Verwertungsquote für Altfahrzeuge geleistet wird. Zwar machen Shredder-Sande $< 5 \text{ mm}$ grade einmal 4 M-% der Fahrzeugmasse in der Verwertung aus (s. [25] und [9]), können aber ausschlaggebend für das Erreichen einer Verwertungsquote zum stofflichen Recycling (derzeit 85 M-% [13]) sein, die ansonsten möglicherweise nur durch sehr kostenaufwändige händische Demontage von Baugruppen zu erreichen wäre. Die damit einhergehenden ökonomischen Effekte konnten allerdings in dieser Arbeit nicht eingehender beleuchtet werden.

6.4 Materialeffizienz und ökologische Wirkung

Für die Bewertung des entwickelten Systems unter ökologischen Gesichtspunkten im Rahmen einer vergleichenden Ökobilanz durch das Öko-Institut e.V. Darmstadt wurde das System des Aufbereitungsverfahrens ebenfalls in zwei Varianten unterteilt. In der als Basis bezeichneten Grundvariante finden sich alle nass-mechanischen Aufbereitungsverfahren. Die erweiterte Variante enthält darüber hinaus auch die nass-chemischen Verfahrensschritte inklusive der Konditionierung des Materials. Die jeweiligen Prozessketten und die damit verbundenen

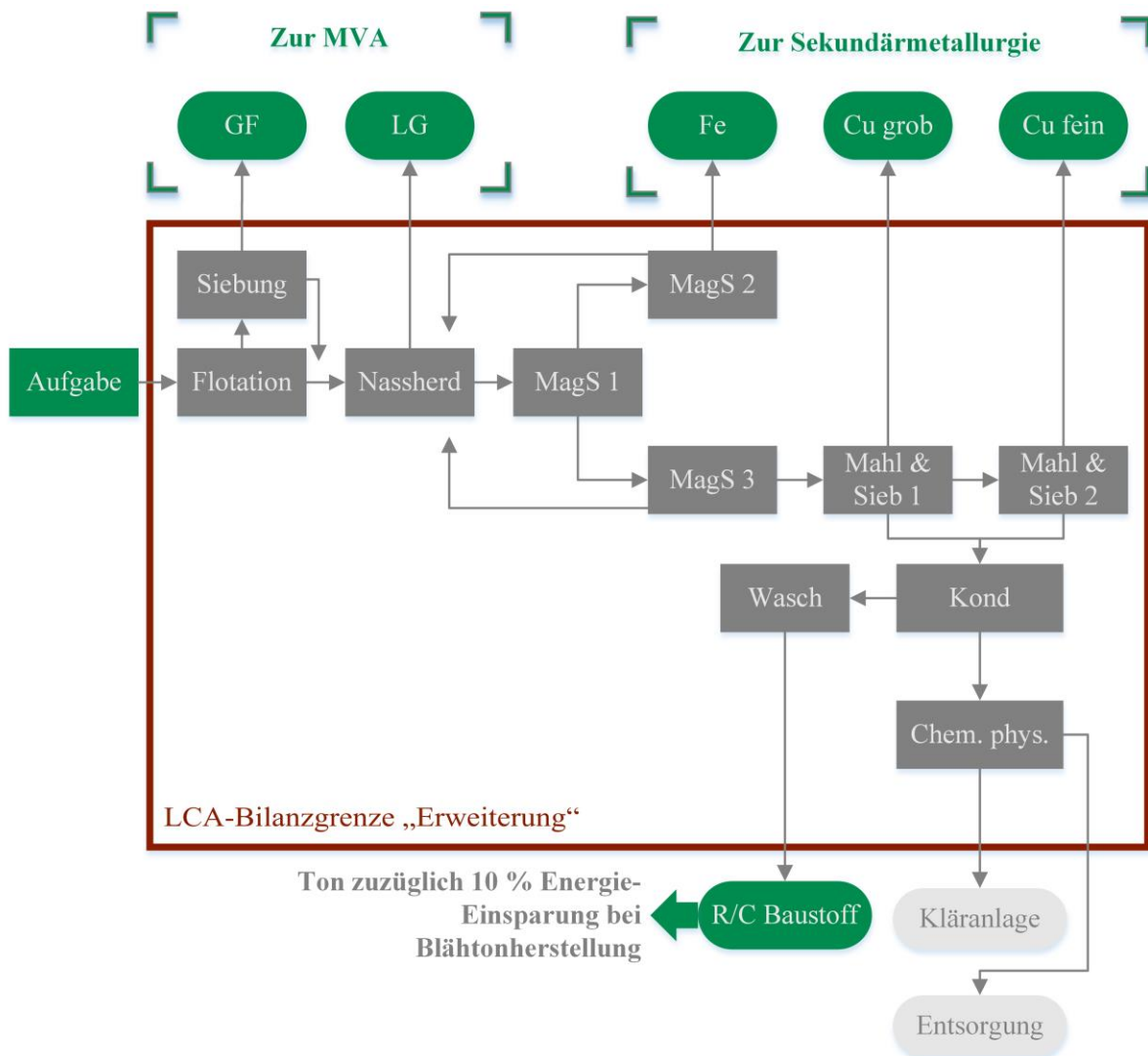
Bilanzgrenzen für das Life-Cycle-Assessment (LCA) können in Abbildung 37 für die Basis-Variante und in Abbildung 38 für die erweiterte Variante nachvollzogen werden.



GF: Grob-Flotat
 LG: Leichtgut
 Fe: Eisen-Konzentrat
 Cu grob: Kupfer-Konzentrat grob
 Cu fein: Kupfer-Konzentrat fein
 MagS: Magnetscheider-Stufe
 Mahl & Sieb: Mahl- und Siebstufe
 Entsorgung: Versatz oder Deponierung

Abbildung 37: LCA-Bilanzgrenze und vereinfachtes Verfahrensfliessbild für die Basis-Variante des Aufbereitungsverfahrens von Shredder-Sanden nach [7]

Neben der Erzeugung von organischen Materialfraktionen zur energetischen Verwertung entstehen in der Basisvariante (Abbildung 37) ein Eisen-Konzentrat und zwei Kupfer-Konzentrate zum Einsatz in Sekundärmetallhütten. Der verbleibende mineralische Produktstrom wird untertägig als Versatzmaterial eingesetzt.



GF: Grob-Flotat

LG: Leichtgut

Fe: Eisen-Konzentrat

Cu grob: Kupfer-Konzentrat grob

Cu fein: Kupfer-Konzentrat fein

MagS: Magnetscheider-Stufe

Mahl & Sieb: Mahl- und Siebstufe

Wasch: Waschstufe für Feststoffe

Kond: Konditionierung und Laugung

ChemPhys: Chemikalisch, physikalische Behandlung

Entsorgung: Versatz oder Deponierung

Abbildung 38: LCA-Bilanzgrenze und vereinfachtes Verfahrensfliessbild für die erweiterte Variante des Aufbereitungsverfahrens von Shredder-Sanden nach [7]

In dem erweiterten System (Abbildung 38) wird das Verfahren dahingehend ausgedehnt, dass die mineralische Fraktion konditioniert und gelaugt wird, um die weiter oben bereits angesprochenen Grenzwerte zum Einsatz als Recycling-Baustoff einhalten zu können. Dadurch entsteht ein zusätzliches Produkt zum Einsatz für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen als Substitut für Blähtone sowie eine Mischmetallfraktion.

Für eine Ökobilanz werden unterschiedliche Wirkungskriterien eines Verfahrens oder einer Technik untersucht und auf die Änderungen hinsichtlich einer Referenztechnik oder eines Referenzverfahrens überprüft. Ströme, die das bilanzierte System verlassen und jenseits der

Systemgrenzen negative Folgen für die Umwelt haben (bspw. Luftschadstoffemissionen, Abwasser, feste Abfälle), werden dem System im Rahmen der Ökobilanz als potenzielle Umweltlasten angerechnet. In analoger Weise werden Ströme über die Systemgrenzen, die einen weitergehenden Nutzen aufweisen, dem System als Gutschriften angerechnet.

Es ergeben sich dadurch Gut- oder Lastschriften für das Verfahren, die mit dem Referenzszenario verglichen werden können. Die Rückführung von Metallen, die in der Erzeugung aus Primärrohstoffen einen hohen Verbrauch an ökologischen Ressourcen mit sich bringen, stellt dabei in dem hier betrachteten Verfahren die größte Möglichkeit der Gutschriftenerstellung dar.

Weniger aufwändig zu erzeugende Rohstoffe, wie z.B. Quarz-Sand oder Ton als Vergleichsgrößen für die im vorliegenden Prozess erzeugte mineralische Fraktion, ergeben vergleichsweise kleine Gutschriften, da das Einsparpotential zur Erzeugung aus Primärrohstoffen gering ist. In einer Ökobilanz werden nicht nur die direkten Einflüsse der Erzeugung aus Primärrohstoffen berücksichtigt, sondern auch damit zusammenhängende Verarbeitungsschritte, dafür eingesetzte Hilfsstoffe, deren Verarbeitungsschritte etc.

Es wird der Verbrauch an Ressourcen berücksichtigt, meist sowohl energetischer als auch abiotischer Ressourcen. Die in dieser Ökobilanz betrachteten Größen sind zum einen Äquivalenz-Größen emissionsseitiger Elemente oder Element-Verbindungen wie CO_2 als Richtwert für das Treibhauspotential, SO_2 als Äquivalent für das Versauerungspotential (terrestrisch als auch aquatisch, durch säurebildende Abgase) und PO_4 als Elementgröße für das Eutrophierungspotential (durch Umrechnung der verschiedenen Nährstoffemissionen auf Phosphatequivalente).

Eine wichtige Wirkungskategorie ist auch der abiotische Ressourcenverbrauch, da das hier erforschte und entwickelte Verfahren auf die Rückgewinnung wertvoller Sekundärmetalle mit dem Ziel der Substitution primärer Metallressourcen abzielt. Folglich berechnet sich das ADP_{elem} als Quotient aus der Extraktionsrate einer Ressource und dem Quadrat der „ultimate reserve“ (Weitestgehende Definition von Reserve: absolutes Vorkommen in der Erdkruste) dieser Ressource; bezogen wird auf Antimonäquivalente.

Der kumulierte Energieaufwand aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Quellen ergibt sich durch die unteren Heizwerte der verschiedenen Energieträger in MJ, was auch das Produkt oder die Produkte beinhaltet. Die Wirkungskategorien sind in Tabelle 48 mit Abkürzung und Einheit aufgeführt.

Tabelle 48: Durch die Ökobilanz berücksichtigte Wirkungskategorien (vgl. [7])

Wirkungskategorie	Abkürzung	Einheit
Treibhauspotential (Global Warming Potential)	GWP	kg-CO ₂ -eq
Erneuerbarer und nicht erneuerbarer kumulierter Energieaufwand	KEA _{ges}	MJ
Versauerungspotenzial (Acidification potential)	AP	kg-SO ₂ -eq
Verbrauch abiotischer elementarer Ressourcen (Abiotic depletion potential of elements)	ADP _{elem}	kg-Sb-eq
Überdüngungspotenzial (Eutrophication potential)	EP	kg-PO ₄ -eq

Betrachtet man nun die einzelnen Produktgruppen, die im Recyclingverfahren für Shredder-Sande entstehen, sind aus ökobilanzieller Sicht vor allem die Gutschriften für die Substitution im Bereich der Metalle hervorzustellen.

Bei Eisen ist entscheidend, ob das Eisen metallisch oder oxidisch vorliegt. Zum einen, weil für den oxidischen Anteil Eisenerz vor der Verhütung gutgeschrieben wird. Zum anderen wird aber auch für nicht oxidiertes Eisen eine Gutschrift für Steinkohlekoks und Steinkohle gegeben, da dieses Material zur Hälfte für die Reduktion eingesetzt wird.

Besonders große Gutschriften werden durch die Rückgewinnung des Kupfers erzielt. Das Kupferkonzentrat kann zu 95 % als Primärkupfer gutgeschrieben werden. Die verbleibenden 5 % stellen Umschmelzverluste dar.

Auch das Baustoffvorkonzentrat kann berücksichtigt werden, ersetzt es doch bisher genutzte Blähtone, die so substituiert werden können. Aufgrund der Häufigkeit der hier substituierten Ressource und der vergleichsweise geringen ökologischen Bedeutung der Gewinnung fallen diese Gutschriften allerdings deutlich geringer aus, als Gutschriften für rückgewinnbare Metalle.

Hinsichtlich der Auswertung der einzelnen Wirkungskategorien musste festgestellt werden, dass als Lasttreiber zwei Dinge relevant sind: Zum einen die Deponierung der festen Rückstände in untertägigem Versatz bei der Basis-Variante und zum anderen der Hilfsstoffeinsatz für die Laugung in der erweiterten Variante.

Einen Überblick der Ergebnisse der einzelnen ökobilanziellen Untersuchungen gibt Tabelle 49. In der Tabelle sind neben den beiden Variationen „Basis“ und „Erweiterung“ noch zwei

Sensitivitätsanalysen und die Vergleichsgrößen für den direkten untertägigen Versatz aufgeführt.

Die erste Sensitivitätsanalyse („20 % SK Gutschrift“) simuliert einen 40 % Anteil an metallischem Eisen im Eisenkonzentrat, was eine 20 %ige Gutschrift für den Einsatz von Steinkohle bedeutet. Die zweite Sensitivität berechnet die 90 %ige Kreislaufführung der Prozesswässer. Beide Sensitivitätsanalysen basieren auf der Basis-Variante.

Es ist deutlich zu erkennen (siehe Tabelle 49), dass die Ansätze zum Recycling von Shredder-Sanden in allen Varianten gesteigerte GWP-Werte im Vergleich zum Referenzmodell aufweisen, was auf die Lasten der Konditionierung für den untertägigen Versatz (Einsatz von Zement zur Eindickung der wässrigen Schlämme), die Verbrennung der Organikfraktionen und bei der Erweiterung auf den Hilfsstoffeinsatz (Säure und Lauge) zurückzuführen ist.

Tabelle 49: Überblick über die ökobilanzielle Bewertung des Shredder-Sand-Recyclings (Basisvariante, Sensitivitätsanalysen und Referenzszenario) nach [7]

Verfahrensvariante	Treibhauspotential (GWP) / kg CO ₂ -eq	Versauerungspotential (AP) / kg-SO ₂ -eq	Verbrauch abiotischer elementarer Ressourcen / kg Sb-eq	Eutrophication potential / Kg PO ₄ -eq	Erneuerbar und nicht erneuerbar kumulierter Energieaufwand / MJ	Feste Abfälle zur Ablagerung / kg TS	Wasseranteil in Abfällen / % TS
Basis	515	-0,23	-0,0089	-1,1	3,2	630	30
Erweiterung	1030	0,2	-0,0087	-0,9	8,6	740	30
20 % SK Gutschrift (auf Basis-Variante)	485	-0,26	-0,0089	-1,1	2,9	630	30
90 % Kreislauf Prozesswasser (auf Basis-Variante)	495	-0,29	-0,0089	-1,1	2,8	630	30
Referenz 100% Bergeversatz	137	0,67	1,8 ^{e-4}	0,39	3,2	1000	0

Aufgrund der hohen Lasten des Hilfsmiteileinsatzes liegt das erweiterte Szenario darüber hinaus beim KEA_{ges} deutlich über den Werten der Referenz. In der Basisvariante liegt der KEA_{ges} dagegen in der gleichen Größenordnung wie die Referenz.

Für die Basis-Variante ergeben sich bis auf das GWP gleichbleibende oder deutliche Reduzierungen in den betrachteten Kenngrößen, die durch die Rückgewinnung und Rückführung der Metalle zu erklären sind. Der Punkt des kumulierten Energieaufwandes (erneuerbar und nicht erneuerbar) kann durch die Beschränkung auf nass-mechanischen Verfahrensstufen (Basis-Variante) auf dem Level des Referenz-Verfahrens gehalten werden. Selbst die erweiterte Variante des Verfahrens kann in den Bereichen Versauerungspotential, Verbrauch abiotischer elementarer Ressourcen und Überdüngungspotential teilweise bessere

Ergebnisse vorweisen als der Einsatz im Bergeversatz. Allerdings sind diese Vorteile verhältnismäßig gering - einzig ADP_{elem} und EP zeigen derart signifikante Verbesserungen im Vergleich zum Referenz-Szenario auf, wie es die Basis-Variante aufzeigt. Würde eine Integration der gesamten Technologie, insbesondere der nass-chemischen Stufe in existierende Anlagen, Betriebsabläufe und Betriebsmediensysteme erfolgen, ist eine weiter verbesserte Bilanz zu erwarten.

Die erweiterte Verfahrensführung setzt in den hier ermittelten Szenarien allerdings eine Beseitigung des metallischen Mischkonzentrates voraus und berücksichtigt nur die Abgabe der mineralischen Fraktion als Substitut für herkömmliche Blähtone. Eine Potentialabschätzung des Öko-Instituts zeigt, dass bei Rückgewinnung der im Fällungsschlamm enthaltenen Metalle durch eine hydrometallurgische Stufe Chancen zur Verbesserung der Ökobilanz des erweiterten Verfahrens bestehen. Um in einem theoretischen Ansatz diese maximale Potentiale abzuschätzen, wurden folgende best-case Annahmen getroffen [8]:

1. Die mit dem (bisher nicht bekannten) Aufbereitungsschritt verbundenen Lasten werden nicht dargestellt. Für eine vollständige Beurteilung der ökologischen Vorteilhaftigkeit der Rückgewinnung der Metalle, muss jedoch, neben den potenziell erzielbaren Gutschriften, auch die Last des Aufbereitungsprozesses (inkl. der umweltgerechten Entsorgung der Rückstände) betrachtet werden.
2. Aus dem potenziellen Aufbereitungsschritt werden die Metalle in einer Qualität erhalten, die deren direkten Einsatz als reiner Sekundärrohstoff in der Weiterverarbeitung erlaubt. (Sollte dies mit dem zu entwickelnden Aufbereitungsschritt nicht möglich sein, müssen für die vollständige Gegenüberstellung zu den Gutschriften, neben den Lasten des Aufbereitungsschrittes auch die Lasten der Weiterverarbeitung zu der erwähnten Qualität mitberücksichtigt werden.)
3. Die Metalle werden vollständig aus den Fällungsschlämmen abgetrennt. (Ein realer Aufbereitungsprozess könnte sie nur anteilig zurückgewinnen; die Gutschriften wären entsprechend reduziert.)
4. Die reinen Sekundärmetalle substituieren zu 100% die jeweiligen Primärmetalle und sind qualitativ gleichwertig.
5. Die für die Bewertung verwendeten Datensätze stammen aus ecoinvent v2.2 und wurden in GaBi ausgelesen. Für die Bewertung in den einzelnen Wirkungskategorien

wurden die Charakterisierungsfaktoren nach CML 2001 (Update Nov. 2010) bewertet. Bei den Treibhausgasemissionen wurden biogene CO₂-Emissionen nicht berücksichtigt. Für den gesamten kumulierten Energieaufwand wurde der „Primärenergiebedarf aus regenerativen und nicht-regenerativen Ressourcen, unterer Heizwert“ zugrunde gelegt.

Auf Grundlage dieser Annahmen kann für jedes Metall ein theoretisches Potential ermittelt werden, dass bei einer Rückgewinnung in das Ergebnis des erweiterten Szenarios einfließen würde. Diese Werte stellen äquivalente des Aufwands in der Primärherstellung dar und sind in Tabelle 50 in der Zeile „Gesamt“ aufgeführt. Es muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse aus den Metallrückgewinnungen jeweils eine Gutschrift darstellen und so mit negativem Vorzeichen in eine entsprechende Bilanzierung eingehen würden. Als Gutschriften für die Metalle sind diese Werte also von den in Tabelle 49 aufgeführten Werten zu subtrahieren.

Tabelle 50: Theoretische Potentialverbesserung der ökobilanziellen Wirkungskategorien durch die Nutzung wichtiger Metalle des Fällungsschlammes mit Vergleichswerten aus den Prozessstufen „Basis“ und „Erweitert“ [8]

	Masse / kg	Treibhauspotential (GWP) / kg CO ₂ -eq	Versauerungspotential (AP) / kg-SO ₂ -eq	Verbrauch abiotischer elementarer Ressourcen / kg Sb-eq	Überdüngungspotenzial / Kg PO ₄ -eq	Erneuerbarer und nicht erneuerbarer kumulierter Energieaufwand / MJ
Aluminium	4,5	55,4	0,26	0,00007	0,10	842
Kupfer	0,6	1,5	0,14	0,00117	0,17	27
Eisen	21,0	31,7	0,12	0,00001	0,06	464
Blei	1,5	3,2	0,08	0,01022	0,02	36
Zink	6,0	20,3	0,28	0,00386	0,13	321
Gesamt	33,6	112	0,9	0,015	0,48	1690

Den einzelnen Beitrag der Metalle zu den Wirkungskategorien stellt Abbildung 39 dar.

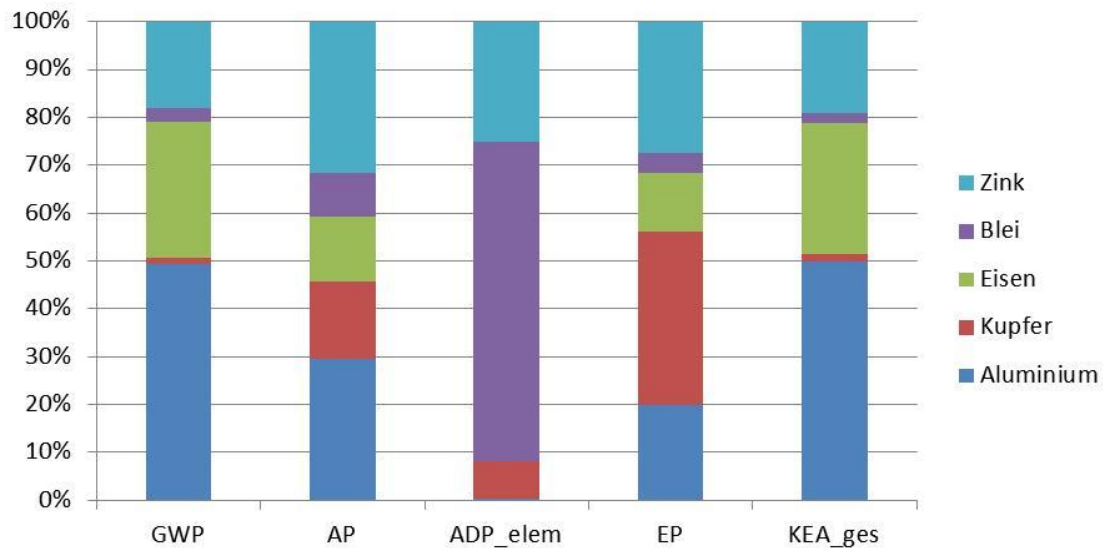


Abbildung 39: Beitrag einzelner Metalle des Fällungsschlammes zu den Wirkungskategorien der vergleichenden Ökobilanz - Potentialabschätzung [8]

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Basisvariante in bestimmten Kategorien vorteilhafter als das Referenzszenario abschneidet. Diese Kategorien sind: Versauerungspotenzial, Eutrophierungspotenzial und Verbrauch elementarer abiotischer Ressourcen. In der Kategorie des kumulierten Energieaufwands liegen beide Szenarien gleich auf und im Bereich des Treibhauspotentials schneidet das Referenzszenario besser ab. Dies lässt sich mit der untertägigen Deponierung (Einsatz von Zement zum Eindicken) sowie der Verbrennung der organischen Fraktionen (CO₂-Emission) erklären.

Das erweiterte Verfahren mit einer chemischen Behandlung der mineralischen Fraktion erzeugt lediglich eine Fraktion, für die keine Gutschriften angesetzt werden können. Das LCA empfiehlt „[...] die zukünftige Forschung und Entwicklung auf eine weitere Optimierung der Basisvariante zu konzentrieren. Die Gewinnung des Baustoffvorkonzentrats über nasschemische Schritte hingegen verspricht aus ökologischer Sicht kaum eine Perspektive.“ [7].

7 Zusammenfassende Bewertung unter technischen, ökologischen und ökonomischen Aspekten

7.1 Technische Bewertung

Ziel des Vorhabens war es, ein Aufbereitungsverfahren für Shredder-Sande zu entwickeln, mit einer kaskadierten Ausschleusung unterschiedlicher Stoffströme. Unter technischen Gesichtspunkten konnte ein solches Verfahren entwickelt werden. Die angestrebten Ziele zur Aufbereitung sind im Labormaßstab verfahrenstechnisch dargestellt und erreicht worden. Bei einer vollständigen Umsetzung des entwickelten Verfahrens ohne Hinblick auf ökologische und ökonomische Umsetzbarkeit könnten ca. 61 M-% der Shredder-Sande in eine stoffliche Verwertung gebracht werden. Etwa 24 M-% stellen organische Rückstände dar, die der energetischen Verwertung zugeführt werden können. Für ca. 15 M-% sind noch keine Verwertungswege identifiziert worden, so dass diese Mischmetallfraktion deponiert werden müsste. Allerdings muss dabei in die bereits angesprochenen zwei Verfahrensvarianten unterteilt werden. Während durch die erweiterte Variante mit chemischer Behandlungsstufe bei Einsatz der gelaugten Mineralikfraktion als Baustoff nahezu 85 M-% des Materials einer Verwertung zugeführt werden könnten, reduziert sich der Anteil der verwertbaren Fraktionen in der Basisvariante. Ohne den chemischen Behandlungsschritt wird weder das Baustoffvormaterial noch die Fällungsschlammfraktion erzeugt. Es würden so nur etwa 51 M-% des Shredder-Sandes in die verwertbaren Fraktionen „Kupferkonzentrat“ (1 M-%), „Eisen-Konzentrat“ (26 M-%) und „kombinierte organische Fraktion“ (24 M-%) überführt.

Das Verfahren könnte daher unter technischen Gesichtspunkten in eine Pilotanlage überführt werden. Es werden von der Entwicklung einer Pilotanlage hauptsächlich Ergebnisse zu drei wichtigen Fragestellungen erwartet: Zum einen muss evaluiert werden, welches Wasserverbrauchs-Szenario praktikabel umgesetzt werden kann. Hier spielt vor allem die Störstoffanreicherung im Prozesswasser eine entscheidende Rolle. Zum zweiten müssen die Scale-Up-Effekte der Anlage überprüft werden. Hier können sich maschinenbedingt Änderungen in den Konzentraten ergeben, die ebenfalls nicht abschließend durch Laboruntersuchungen bestimmt werden können. Damit einhergehend besteht drittens schließlich die Möglichkeit der Steigerung von Eisen- und Kupfer-Qualitäten durch optimale Abstimmung der Verfahrensstufen über das Maß der Scale-Up-Effekte hinaus.

7.2 Ökologische Bewertung

Die Auswertung der Ergebnisse des Ressourceneffizienzpotentials und der vergleichenden Ökobilanz zeigt die Chancen der gewählten und entwickelten Route zur Aufbereitung von Shredder-Sanden mit Korngrößen ≤ 1 mm. Sie weist aber auch darauf hin, dass nicht alles technisch Machbare unter ökologischen Aspekten sinnvoll ist, sondern ökologische Grenzen bei der Aufbereitung und Nutzung dieser Reststoffe existieren.

Die ökologisch vergleichende Bewertung des Verfahrens stellt dem Verfahren in der Basis-Variante (nass-mechanische Verfahrensstufen) eine Verbesserung gegenüber dem derzeitigen Haupteinsatzgebiet als Berge-Versatz aus. Das erweiterte Verfahren wurde mangels definierter Einsatz- und Betriebsparameter der rückgewinnbaren Stoffe nur dahingehend analysiert, wie sich das Verfahren als „Stand-Alone“-Variante ohne Metallrückgewinnung verhält. Dadurch, dass die erzeugbare Metallfraktion dahingehend bewertet wurde, dass sie nicht in den Stoffkreislauf zurück geführt wird, sondern als Stoff zur Beseitigung anfallen würde, kann kein positives Ergebnis nachgewiesen werden. Das Steigerungspotential in den Ergebnissen der Ökobilanz durch integrierte Verfahrensführung in einem größeren Verfahren mit einer Erzeugung von einsetzbaren Metallkonzentraten und einer RC-Baustofffraktion wird durch die Potentialabschätzung dargestellt.

7.3 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung des Verfahrens durch eine Investitionsplanung und der Abfrage der aktuellen Marktsituation hat ergeben, dass sich das Verfahren derzeit unter aktuellen Markt- und anderen Rahmenbedingungen nicht tragen würde. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen und des Businessplans konnte dennoch eine potentielle Marktwirtschaftlichkeit des Verfahrens dargestellt werden. Hierbei sind allerdings die getroffenen Annahmen zu beachten: Neben den technisch bedingten Aspekten (Verbrauch an Frischwasser und Qualität des Eisen-Konzentrats) bedarf besonders die Akquise anlagenadäquater Mengen bei der Fragestellung der Umsetzbarkeit besondere Aufmerksamkeit. Erst ab einer Menge von ca. 60.000 t Shredder-Sand pro Jahr kann ein positiver Markteffekt erreicht werden. Durch die fehlenden Vorbehandlungsstufen in Deutschland kann daher eine Umsetzung für den deutschen Raum derzeit nicht erfolgen. Unter Einbeziehung des europäischen Umlandes konnten Hot-Spots ermittelt werden, die am ehesten entsprechende Mengen in Aussicht stellen können, wenn vor Ort Anlagen nach dem Volkswagen-SiCon-Prinzip integriert würden.

Wichtigste Parameter für die wirtschaftliche Behandlung von Shredder-Sand sind darüber hinaus der Annahmepreis des Shredder-Sandes und der Abgabepreis der Mineralik, da sie ohne weitere Behandlung der mineralischen Fraktion stark gekoppelt sind. Eine Entkopplung kann durch eine chemische Stufe erreicht werden, die aus der Fraktion zwei neue Wertstofffraktionen erzeugt. Die Mengenproblematik allerdings erlaubt in diesem Zusammenhang unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten keine Stand-Alone-Variante. Aktuelle Entwicklungen in der metallurgischen Industrie weisen alternative Optionen auf, konnten aber auf Grund des frühen Planungsstandes der hydrometallurgischen Verfahrensstufe noch nicht weiter verfolgt werden. Dieser Schritt kann systematisch auch sinnvoll erst bei der Umsetzung einer Pilotanlage für den nass-mechanischen Bereich des Aufbereitungsverfahrens überprüft werden, um entsprechende Mengen zu generieren. Die Recylex GmbH hat bezüglich der mineralischen Fraktion angekündigt, dass eine Integration der notwendigen Verfahrensstufen in die derzeit geplanten hydrometallurgische Aufbereitungstechnik als möglich gesehen wird und zu gegebener Zeit geprüft wird. Dies würde bedeuten, dass sowohl ein mineralisches Konzentrat für die Baustoffindustrie und die Erzeugung von Blähgranulaten erzeugt werden kann, aber auch die metallischen Anteile unter minimalen Aufwand zurückgewonnen werden können. Dadurch würde sich der bereits in Kapitel 6.3 angesprochene Entkopplungseffekt der mineralischen Fraktion vom Shredder-Sand-Annahmepreis darstellen lassen. Sollten sich daraus belastbare Szenarien entwickeln, sollte eine erneute wirtschaftliche Beurteilung erfolgen.

8 Fazit und Ausblick

Hinsichtlich des Aufbereitungsverfahrens der Shredder-Sande aus Rückständen des VW-SiCon-Verfahrens wurden zahlreiche angestrebte Ziele erreicht. So konnte die effiziente und gezielte Ausschleusung von organischen Bestandteilen in eine energetisch verwertbare Fraktion dargestellt werden. Anders als zunächst geplant, wurden hierfür allerdings zwei Verfahrensstufen eingesetzt. Durch das Abtrennen einer textilen Fraktion mittels Flotation im ersten Schritt konnte im zweiten Schritt der Nassherd sehr viel effizienter auf die Abtrennung der verbliebenen Organikbestandteile (Holz, Hartkunststoff, Lackpartikel etc.) eingestellt und die Separation verbessert werden. Die organischen Bestandteile machen in Summe etwa 24 M-% der Ausgangsmasse aus und haben einen durchschnittlichen Brennwert, der den Einsatz zur energetischen Verwertung ermöglicht.

Im Bereich der Metallerückgewinnung konnte nachgewiesen werden, dass aus Shredder-Sanden sowohl marktgängige Eisen- wie auch Kupferkonzentrate erzeugt werden können.

Der Anteil des Eisenkonzentrates übersteigt mit 26 M-% von der Input-Masse die ursprünglich prognostizierte Menge. Für diese Fraktion konnte ein potentieller Abnehmer aus der Eisenmetallurgie gefunden werden. Untersuchungen mit dem Ziel das Material für andere Einsatzzwecke zu nutzen, etwa als Reduktionsmittel und Schlackenbildner in der Sekundär-Kupfer-Metallurgie oder als Eisen-Träger in der Zementproduktion erwiesen sich als weniger zielführend. Durch die gewählte Verfahrensführung konnten rund 73 % des Eisens in dieses Eisenkonzentrat überführt werden.

Im Mittel konnten darüber hinaus 55 % des im Shredder-Sand enthaltenen Kupfers durch rein mechanische Aufbereitungsprozesse in metallurgisch verwertbare Konzentrate überführt werden. Dieser Anteil macht, bezogen auf das Ausgangsmaterial etwa 1 M-% aus. Ein weiterer Teil des Kupfers ist an das Eisenkonzentrat gebunden (etwa 8,5 % der enthaltenen Kupfermenge) und kann dort bei der Produktion von speziellen kupferhaltigen Gusseisensorten genutzt werden. Der restliche Kupferinhalt kann über Laugestufen abgetrennt werden, steht aber derzeit noch nicht zur weiteren Nutzung zur Verfügung (s.u.).

Die mineralischen, überwiegend silikatischen und oxidischen Bestandteile lassen sich durch den vorgeschlagenen Verfahrensweg mit chemischer Behandlungsstufe in eine Mineralik-Fraktion überführen, die die chemischen Spezifikationen erfüllt, welche für eine Nutzung zur Erzeugung von RC-Baustoffen erforderlich sind. Der Anteil an der Ausgangsmenge beträgt durchschnittlich 34 M-% und enthält 95 % der silikatischen und oxidischen Bestandteile

(inklusive Quarz) des Aufgabe-Materials. In Kooperation mit der Bauhaus-Universität Weimar konnten durch Verknüpfung mit Entwicklungen im Rahmen des dort bearbeiteten r²-Projektes „Aufbaukörnung“ Optionen entwickelt werden, die Mineralik-Fraktion zur Aufbaukörnung und Blähgranulatherstellung zu nutzen.

Zum finalen Abreinigen der Mineralik-Fraktion von verbliebenen Metallen wurde eine salzsaure Laugung durchgeführt, die die entsprechenden Metalle in ausreichender Menge in Lösung bringt. Da sich die fraktionierte Rückgewinnung der in Lösung befindlicher Metalle durch Extraktion als möglich, wirtschaftlich und ökologisch allerdings als nicht sinnvoll darstellt, wurde hier die gemeinsame Ausfällung aller Metalbestandteile mittels Neutralisationslösung vorgesehen. Die so entstehende Fraktion aus gefällten Mischmetallen macht etwa 15 M-% der Input-Menge aus und besteht aus einer Mischung aus hauptsächlich Eisenhydroxiden und Salz. Die weiteren Metalle sind im einstelligen Prozentbereich vertreten. Für diese Fraktion gibt es derzeit noch keine Verwertungsrouten.

Die Aufteilung der durch diese Verfahrensvariante erreichbaren Mengen stellt Abbildung 40 dar:

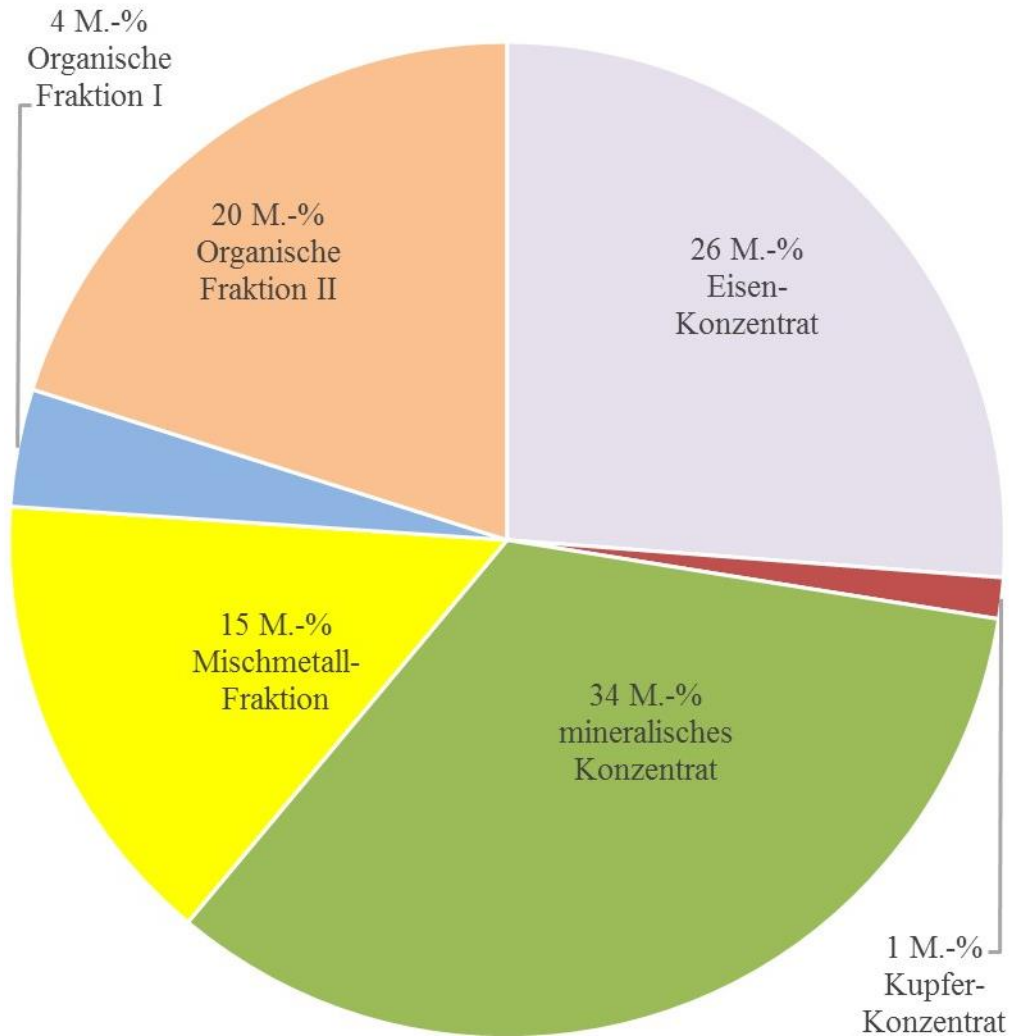


Abbildung 40: Erreichbare Anteile der Fraktionen bezogen auf die Aufgabe in das Verfahren bei Umsetzung der "Erweiterten Variante"

Da die nass-chemische Aufreinigung und Abtrennung der so erhaltenen Metalle allerdings nur unter bestimmten Rahmenbedingungen wirtschaftlich darstellbar ist und nur bei Integration der notwendigen Verfahrensstufen in eine vorhandene hydrometallurgische Aufbereitungsrouten positiv durch die Ökobilanz bewertet werden kann, wurde der letzte nass-chemische Verfahrensschritt vom vorangehenden Verfahren abgekoppelt und separat betrachtet. Dadurch wird das Verfahren nach der letzten Siebstufe beendet, so dass die Fraktionen der mineralischen Fraktion und die Mischmetall-Fraktion nicht erzeugt werden. Die entstehenden Fraktionen stellen sich demnach entsprechend Abbildung 41 dar:

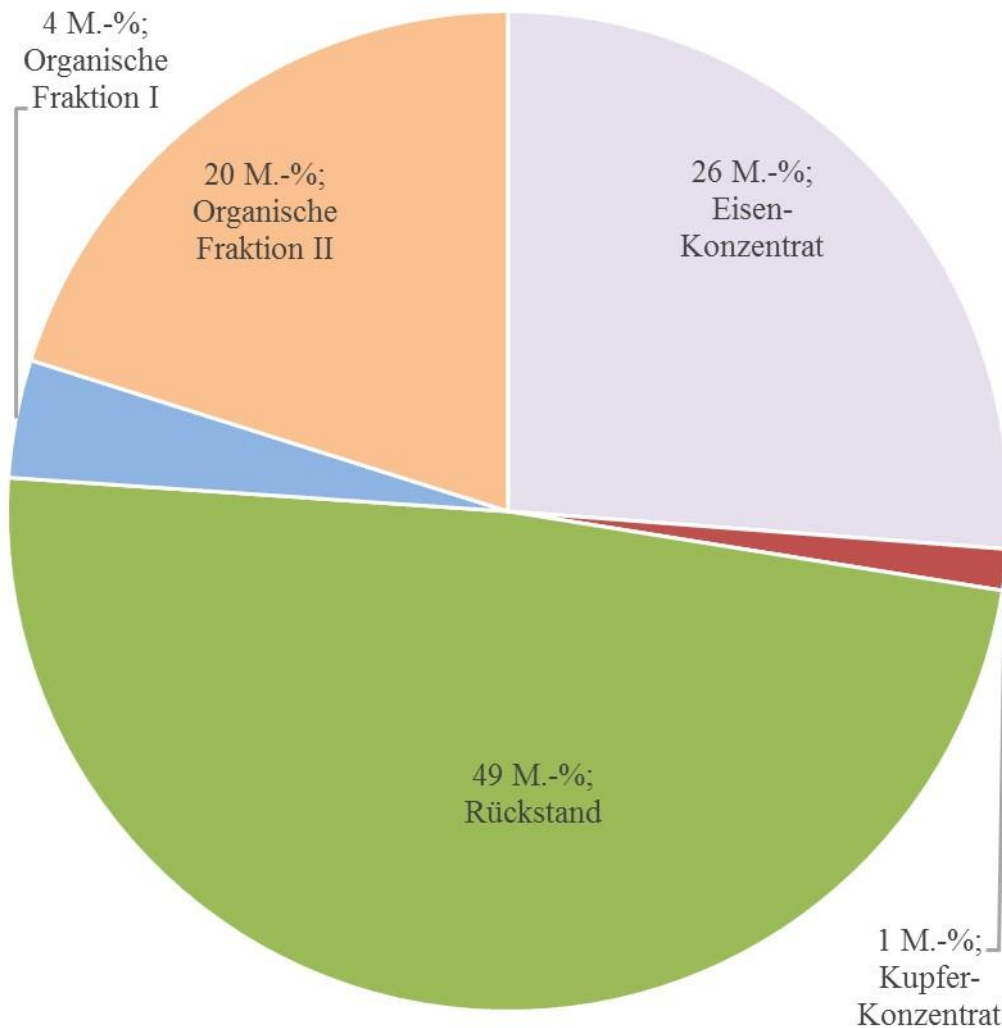


Abbildung 41: Erreichbare Anteile der Fraktionen bezogen auf die Aufgabe in das Verfahren bei Umsetzung der "Basis-Variante"

Die auf den Grundlagen des entwickelten Verfahrens durchgeführte wirtschaftliche Betrachtung legt nahe, dass für das wirtschaftlich erfolgreiche Recycling von Shredder-Sanden jährlich zu behandelnde Mengen von mindestens 60.000 t vorausgesetzt werden müssen. Da diese Mengen allerdings die Vorbehandlung mittels Anlagen nach dem VW-SiCon-Verfahren voraussetzen, welche in Deutschland zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht zur Verfügung stehen, kann das hier entwickelte Verfahren unter den momentanen Voraussetzungen nicht umgesetzt werden. Hinsichtlich der Aufbereitung von Shredder-Sanden konnte aber gezeigt werden, dass zwischen 51 M.-% („Basis-Variante“) und 85 M.-% („Erweiterte Variante“) einer Verwertung insgesamt zugeführt werden können. Hinsichtlich der in der AltfahrzeugV geforderten Verwertungsquoten kann festgestellt werden, dass vom Shredder-Sand mindestens 24 M.-% einer Verwertung und zusätzliche 27 M.-% einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können. Je nach Verfahrensvariante kann der Anteil

der stofflich verwertbaren Fraktionen auf bis zu 61 M-% gesteigert werden, wenn das mineralische Konzentrat für den Einsatz in der Baustoffindustrie erzeugt würde.

Durch die Untersuchungen und Analysen konnte dennoch ein wichtiger Schritt in der Aufbereitungskette von Shredder-Sanden gemacht werden. Speziell die Untersuchungen zur Stoffcharakterisierung und dem Sortier- und Klassierverhalten liefern wichtige Erkenntnisse zum Verständnis des Aufbereitungsverhaltens von heterogenen, feinkörnigen Abfallströmen. Auf der Grundlage der hier entwickelten Verfahrenskette können weitere Arbeiten aufsetzen. Potentiale konnten aufgezeigt werden, um die Recyclingquote und damit die Ressourcensicherung durch Shredder-Sande weiter zu steigern. Durch die vernetzten Arbeiten der Projektpartner mit anderen Institutionen aus Forschung und Wirtschaft konnten neue Kooperationsfelder und neue Einsatzmöglichkeiten einzelner, im Prozess entstehender Stoffströme entwickelt werden.

So hat die Steigerung des Verständnisses für die Aufbereitung von Shredder-Sanden nicht nur einen möglichen Verfahrensweg zur Erweiterung des Volkswagen-SiCon-Verfahrens geliefert, sondern auch gezeigt, wie dieser anlagentechnisch an eine bestehende Volkswagen-SiCon-Anlage adaptiert werden kann.

Auf Basis der Erkenntnisse im Bereich des Aufbereitungsverhaltens feinsten Metallpartikel aus Shredder-Sand wurden neue Optionen zur Behandlung ermittelt. So wurde durch das entwickelte Verfahren ein neuer Stoffstrom zum Einsatz in hydrometallurgische Routen erzeugt.

Für die zu erfüllenden Recyclingquoten von End-Of-Life-Produkten konnte eine Möglichkeit aufgezeigt werden, wie ein weiterer wichtiger Anteil von bisher unzureichend verwerteten Rückständen zurück in den Kreislauf gebracht werden kann. Zwar haben Shredder-Sande mit Korngrößen $< 1\text{ mm}$ mit nur 2 M-% einen verhältnismäßig kleinen Anteil an der Gesamtmasse der Rückstände aus z.B. ELV, könnten aber die Verwertungsquoten von Fahrzeugen um 1 % bis fast 2 % steigern, je nach Ausführung des Aufbereitungsverfahrens.

Bei sich ändernder Marktsituation, speziell im Bereich der Beseitigungskosten, kann durch die Umsetzung des hier entwickelten Verfahrens ein wertvoller Beitrag zum Umweltschutz geleistet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] BEYERBACH, H.: *Untersuchungen zur Aufbereitung von Shreddersand aus dem Volkswagen-SiCon-Verfahren*. Diplomarbeit. Clausthal-Zellerfeld, 2007. – Diplomarbeit
- [2] DUWE, C.: *Untersuchungen zur Entwicklung des Zink-Gehaltes in Shredder-Sanden und zur mineralogischen Spezifikation der Zinkpartikeln* : Diplomarbeit. Clausthal-Zellerfeld, 2009
- [3] WANG, R.: *Trennung von Kupfer, Blei, Zink und Eisen in chloridischer Lösung* : Studienarbeit am IFAD, Technische Universität Clausthal. 2012
- [4] RILEY, C. M.: *Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays*. In: *Journal of the American Ceramic Society* 34 (1951), Nr. 4, S. 121–128
- [5] WILSON, H.: *Lightweight aggregates for the construction industry*. In: *Journal of the Canadian Ceramic Society* (1953), Nr. 22, S. 44–48
- [6] WENDT, B.: *Aufkommen und Verwertung von Shredder-Sanden in Europa*. Studienarbeit an der Fakultät für Fahrzeugtechnik der Ostfalia Hochschule Wolfsburg. Wolfsburg, 18.02.2011. – Studienarbeit an der Fakultät für Fahrzeugtechnik der Ostfalia Hochschule Wolfsburg
- [7] BUCHERT, M. ; JENSEIT, W. ; MERZ, C.: *Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shredder-Sanden* : Ökobilanzielle Bewertung im Auftrag der Volkswagen AG. Darmstadt, 07.12.2012
- [8] MERZ, C. ; BUCHERT, M.: *Kurzdokumentation zur orientierenden Abschätzung des Potentials der Metallrückgewinnung aus den Fällungsschlämmen*. 26.06.2013
- [9] GOLDMANN, D.: *Shredder-Sand* : Rückgewinnung feinkörniger NE-Metallphasen aus Shredder-Sanden. Projektskizze BMBF-Projekt Shredder-Sand. Clausthal-Zellerfeld, 2008. – Projektskizze BMBF-Projekt Shredder-Sand
- [10] BABIES, H.-G. ; BUCHOLZ, P. ; HOMBERG-HEUMANN, D. ; HUY, D. ; KUS, J. ; MEßNER, J. ; NEUMANN, W. ; RÖHLING, S. ; SCHAUER, M. ; SCHMITZ, M. ; WILKEN, H.; TALLIG, Annegret (Mitarb.); WEHENPOHL, Bernard (Mitarb.) : *DERA Rohstoffinformationen : Deutschland – Rohstoffsituation 2011*. Berlin, 12/2012
- [11] BECKER, C. ; GREBE, T. ; KIRBACH, M. ; DR.-ING. ZWIESELE, B. ; DIPL.-ING. BAATH, A. ; DIPL.-ING. MEISTER, A. ; CAND.-ING. KRÄNKEL, S.: *Die wirtschaftliche Bedeutung der Recycling- und Entsorgungsbranche in Deutschland* : Stand, Hemmnisse, Herausforderungen. Berlin, 2009
- [12] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNOLOGIE (Hrsg.): *Rohstoffstrategie der Bundesregierung : Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen*. Berlin, 10/2010
- [13] BUNDESREGIERUNG: *Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen* (idF v. Neufassung 2002, geändert zuletzt 24. 2. 2012) (2002-06-21)
- [14] KNIBB, Gormezano &. Partners: *Recycling Infrastructure & Post Shredder Technologies*. 2002
- [15] SCHOLZ, O.: *Das Scholz-Aufbereitungsverfahren für die Abfälle der Shredderanlagen*. In: *Recycling Magazin* 2005, 11/2005, S. 20–23

- [16] LSD UMWELT UND RECYCLINGTECHNOLOGIE GMBH (Hrsg.): *Informationsmappe-Sortierung von Shredderleichtfraktion mit WESA- SLF*. Hanau, 1999
- [17] PRETZ, T. ; JULIUS, J.: Kunststoffrückgewinnung aus der Shredderleichtfraktion. In: THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J.; VERSTEYL, A.; BECKMANN, M. (Hrsg.): *Produktverantwortung : Verpackungsabfälle, Elektro- und Elektronikaltgeräte, Altfahrzeuge*. Neuruppin : TK, 2007, S. 407–417
- [18] REINHARDT, T. ; RICHERS, U.: *Entsorgung von Shredderrückständen - ein aktueller Überblick*. Karlsruhe, 2004
- [19] GHK, BIO INTELLIGENCE SERVICE (Hrsg.): *A study to examine the benefits of the End of Life Vehicles Directive and the costs and benefits of a revision of the 2015 targets for recycling, re-use and recovery under the ELV Directive : Final Report to DG Environment*. Annexes. Birmingham, 5/2006. – Annexes
- [20] KUMMER, B.: *Großversuch bestätigt Wirksamkeit der Scholz-Post-Shredder-Technik*. URL <http://plasticker.de/news/showartikel.php?id=70>. – Aktualisierungsdatum: 2008-08-28 – Überprüfungsdatum 2013-11-06
- [21] RECYCLINGNEWS: *Scholz baut Recycling-Anlage in Espenhain aus*. URL http://www.recyclingmagazin.de/rm/news_detail.asp?ID=15306&SID=452959192168100100&NS=1. – Aktualisierungsdatum: 2011-10-27 – Überprüfungsdatum 2013-11-06
- [22] PRUCKNER, E.: *Erkenntnisse aus der ersten Monitoringphase des Pilotvorhabens: Mechanische Aufbereitung von Shredder-Leichtfraktion (Autorecycling in Europa - Chancen und Risiken)*. Rüsselsheim, 3.-4. Mai 2000
- [23] VOLKSWAGEN AG: *Anlage und Verfahren zur Aufbereitung von Shredder-Rückständen, Deutschland*. Veröffentlichungsnr. PCT/EP01/10460
- [24] VOLKSWAGEN AG: *Anlage und Verfahren zur Aufbereitung von Shredder-Rückständen und Verwendung einer erzeugten Sand-Fraktion*. Volkswagen AG. Veröffentlichungsnr. PCT/EP01/10762
- [25] KRINKE, S. ; BOßDORF-ZIMMER, B. ; GOLDMANN, D.: *Ökobilanz Altfahrzeug-Recycling : Vergleich des VW-SiCon Verfahrens und der Demontage von Kunststoff-Bauteilen mit nachfolgender werkstofflicher Verwertung*. Kurzfassung. Wolfsburg, Juni 2005. – Kurzfassung
- [26] GOLDMANN, D. ; NAGY, A.: *Bericht zur Studie zum aktuellen Stand von Shredder- und Post-Shredder-Technologien : Technik und Recht*. Mai 2009
- [27] BUNDESREGIERUNG: *Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Marion Caspers-Merk, Klaus Lennartz, Michael Müller (Düsseldorf) und weiterer Abgeordneter : — Drucksache 1215391 —: Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Marion Caspers-Merk, Klaus Lennartz, Michael Müller (Düsseldorf) und weiterer Abgeordneter : — Drucksache 1215391 —*. 24.08.1993
- [28] UMWELTBUNDESAMT: *Altfahrzeuge*. URL <http://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-abfallwirtschaft/altfahrzeuge>. – Aktualisierungsdatum: 2014-02-12 – Überprüfungsdatum 2014-04-08
- [29] BUNDESTAG UND BUNDESRAT: *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen* (idF v. 22. 5. 2013) (2012-02-24). URL <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf> – Überprüfungsdatum 2014-02-18

- [30] BUNDESTAG UND BUNDES RAT: *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten* (idF v. 20. 9. 2013) (2005-03-16). URL <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/elektrog/gesamt.pdf> – Überprüfungsdatum 2014-08-11
- [31] BUNDESTAG UND BUNDES RAT: *Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten* (idF v. 3. 5. 2013) (2005-03-16). URL <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/elektrog/gesamt.pdf> – Überprüfungsdatum 2014-02-18
- [32] SCHUBERT, H.: *Sortierprozesse : Dichtesortierung, Sortierung in Magnetfeldern, Sortierung in elektrischen Feldern, Flotation, Klauen, Sortierung nach mechanischen und nach thermischen Eigenschaften ; 56 Tabellen.* 4., völlig neu bearb. Stuttgart : Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1996 (Aufbereitung fester Stoffe / von Heinrich Schubert)
- [33] BECHMANN, Andreas: *Abfallwirtschaftliche und -technische Untersuchungen zur Verwertung kunststoffhaltiger Abfälle am Beispiel von Shredderleichtmüll.* Als Ms. gedr. Aachen : Shaker, 1994 (Berichte aus der Umwelttechnik)
- [34] SCHUBERT, H.: *Kennzeichnung von Körnerkollektiven, Kennzeichnung von Aufbereitungs- und Trennerfolg, Zerkleinerung, Klassierung.* 4., stark überarb. Aufl. Leipzig : Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, 1989 (Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe / von Heinrich Schubert 1)
- [35] BRIESEMEISTER, R. ; DUWE, C. ; HARTMANN, A. E. ; RASENACK, K. P.: *Reifenrecycling : Aufbereitung der Textilfraktion.* Ausarbeitung einer Projektarbeit. Clausthal-Zellerfeld, 24.09.2008. – Ausarbeitung einer Projektarbeit
- [36] BRUCHHOLD, C.: *Der Flotations-Prozess.* Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1927
- [37] BOES, J. ; SCHNEIDER, M. ; SANDER, M.: *Beschreibung des Standes der Technik bei der Vorbehandlung, insbesondere der Trockenlegung von Altautos gemäß AltautoV.* Berlin, September 2002
- [38] BUNDESREGIERUNG: *Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage* (idF v. 24. 2. 2012) (2002-07-24). URL <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/versatzv/gesamt.pdf>
- [39] SCHNELL, A.: *Untersuchungsbericht : Eignung von Rückständen aus der Laugung von Shreddersand zur Herstellung von thermisch porosierte Leichtgranulaten.* Untersuchungen laut Angebot FIB-AN 257-11. Weimar, 11/2012. – Untersuchungen laut Angebot FIB-AN 257-11
- [40] INTERESSENGEMEINSCHAFT DER THERMISCHEN ABFALLBEHANDLUNGSANLAGEN IN DEUTSCHLANDLAND E.V.: *Anforderung an Abfälle zur Verbrennung.* URL <http://www.itad.de/information/wiefunktionierteinemva/338.html> – Überprüfungsdatum 2012-11-12
- [41] UMWELTBUNDESAMT: *Altfahrzeugaufkommen und -verwertung : Shredderleichtfraktion.* URL <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2304>. – Aktualisierungsdatum: Sept. 2010 – Überprüfungsdatum 2013-06-10
- [SICON] Tabelle / Abbildung entnommen aus dem gemeinsamen Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Darstellung durch die SICON erstellt

Anhänge